

# **Congestión vehicular en Medellín: una posible solución desde la Economía**

**Alejandro Corrales Espinosa**

---

## **Abstract**

According to Microeconomic theory it has been proven that prices are the most accurate mechanism to control the congestion problem in urban areas. The aim of this article is to diagnose the mobility issue concerning the city of Medellin and to propose solutions to the given situation based on Economic theory. The relation between the spending in transportation and the choice between public and private transport was analyzed through the method of elasticity. Evidence has been found proving prices as a good mechanism to disincentive the usage of private vehicles, since a rise in the expenditure in transport (due to an hypothetic intra-urban toll), result in a diminution in the probability to use private vehicle and a higher probability to use public transportation.

Desde la teoría económica se plantean los mecanismos basados en precios como una herramienta adecuada para solucionar el problema de congestión vehicular. El objetivo de este artículo es diagnosticar el nivel de congestión vehicular de la ciudad de Medellín y proponer alternativas que desde la economía permitan dar solución ha dicho problema. A diferencia de otros estudios, esta investigación analizó la relación entre gasto en transporte y la elección de transporte (público o privado) a través la metodología de elasticidades. Se encontró evidencia a favor de los precios como mecanismos para desincentivar el uso del automóvil privado, pues a medida que aumenta el nivel de gasto en transporte por parte de los agentes (dada la imposición de un hipotético peaje urbano), la probabilidad de usar transporte privado disminuye, mientras que la probabilidad de utilizar transporte público incrementa.

*JEL* H23, R41; R48.

---

## **1. Introducción.**

En la medida que las ciudades van creciendo y teniendo mayores niveles de desarrollo, también trae consigo mayor ingreso disponible y capacidad de compra incluido el ocio y la satisfacción de necesidades básicas, por ejemplo, tomar la decisión de qué medio de transporte utilizar, tanto para desplazarse a trabajar como para satisfacer sus necesidades cotidianas. Este es el caso de ciudades con un nivel de ingreso alto, como Londres, Estocolmo, Singapur y Chicago, para mencionar solo algunas, lo que a su vez, les ha implicado abordar el tema de ciudades inteligentes, no solamente para reorganizar la actividad económica, sino para anticiparse o solucionar los problemas que esto puede ocasionar en términos de congestión vehicular.

Las principales variables utilizadas para la medición de los costos de congestión vehicular son la magnitud y el costo de oportunidad del tiempo de los usuarios para sus desplazamientos y, la contaminación ambiental. El costo de oportunidad es la valoración del tiempo de esparcimiento sacrificado o de los ingresos dejados de percibir a causa de la congestión. El costo social es superior a la suma de los costos individuales soportados por los usuarios del transporte privado y público, pues en este caso hay una externalidad (un efecto negativo externo), quienes no deben transportarse en vehículos desde o hacia sus residencias también padecen los efectos negativos de las pérdidas de tiempo y de la contaminación por ruido y por respiración de gases tóxicos (Parry, Walls, & Harrington, 2011).

La congestión vehicular es un problema al que se han enfrentado las grandes ciudades en diferentes continentes, donde no ha quedado otra alternativa que utilizar mecanismos tributarios (impuestos pigovianos, que, en este caso, denominamos peajes) para reducir la congestión, pues mecanismos como “el pico y placa” son ineficientes, debido a que en el mediano y largo plazo inducen la demanda de más vehículos y, por lo tanto, incrementan el nivel de congestión. Algunas ciudades donde se han implementado tales impuestos son Londres, Singapur, Estocolmo y Chicago.

Por supuesto, simultáneamente con la implementación de un peaje por congestión es muy importante realizar una buena planeación, la cual debe partir de unos objetivos claros de movilidad como reducir la congestión, lo que implica reducir el número de vehículos en circulación en las horas pico y, aumentar la velocidad y confiabilidad; pero al mismo tiempo debe promocionarse usos alternativos de transporte público y no motorizado, así como mejorar o implementar la infraestructura necesaria para ello, como se ha realizado en Londres y Singapur. Una buena gestión y asignación de los ingresos obtenidos del peaje de congestión debería ayudar a implementar dicha infraestructura, además de promover la equidad mediante la inversión en transporte público.

En el caso de Medellín y el de otras principales ciudades colombianas, cuatro factores han incrementado el número de vehículos y la congestión actual: los altos índices de urbanización, el aumento del ingreso real *per cápita*, la reducción del precio real de los automotores y la mayor facilidad de acceder a créditos de compra de vehículos (Medina y Vélez, 2011). Esto ha hecho que no solo hayan incrementado los niveles de contaminación, sino el tiempo de transporte requerido para recorrer un mismo número de kilómetros se ha incrementado sustancialmente, por ejemplo, entre 2005 y 2012 se incrementó en un 32% (*Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad. (2012)*). Para solucionar estos problemas se han propuesto diferentes medidas como los aumentos de impuestos para comprar o mantener vehículos, el incremento en las tarifas de parqueadero, un mayor impuesto a la gasolina y los peajes urbanos, entre otros. Las medidas hasta ahora aplicadas han logrado evitar una mayor agravación de los problemas mencionados.

Por lo anterior este trabajo tiene como objetivo diagnosticar el nivel de congestión vehicular en la ciudad de Medellín y analizar alternativas económicas, que permitan dar solución a dicho problema de congestión. Para alcanzar estas metas se utiliza un modelo de elección

discreta, específicamente un Logit Multinomial, ya que los agentes deben elegir entre diferentes modos de transportarse como Metro, Automóvil privado, bus u otro medio de transporte. Este tipo de modelo permite articular la teoría económica sobre impuestos Pigouvianos con el problema de congestión vehicular para la ciudad de referencia. A diferencia de la gran mayoría de estudios que existen sobre congestión, que utilizan la metodología de preferencias reveladas y declaradas, este utiliza la elasticidad gasto de la demanda para analizar la sensibilidad cuándo aumenta el gasto en transporte de un individuo representativo para la ciudad de Medellín de acuerdo a la información de la Encuesta de Calidad de Vida para esta ciudad; cómo estaría dispuesto a cambiar o sustituir entre los diferentes modos de transporte para realizar sus desplazamientos.

Uno de los principales resultados indica que si bien Medellín está por debajo del indicador de la ciudad más congestionada del mundo, Ciudad de México, que presenta un 59% más de tiempo para desplazarse en las horas más congestionadas (pico) frente a las menos congestionadas (valle); aún está por encima del indicador para ciudades, que ya han implementado peajes por congestión urbano, como es el caso de Singapur, Estocolmo y Chicago, cuyo porcentaje adicional en las horas pico corresponde a 31%, 29% y 26%, respectivamente. Es importante anotar que Chicago presenta el menor nivel de congestión entre las ciudades de la muestra y, en la actualidad se encuentra implementado medidas para disminuir el nivel de tiempo utilizado para desplazarse en las horas pico. Otro resultados importante, es que la probabilidad de utilizar el transporte privado, automóvil, disminuye; al mismo tiempo que esta probabilidad aumenta en favor de la utilización del transporte público, fundamentalmente bus, cuando se simula la implementación de un peaje urbano, haciendo el supuesto de que el peaje urbano implicaría un incremento en el gasto destinado para la utilización del transporte.

El trabajo se estructura de la siguiente forma, después de esta introducción, la segunda sección realiza una caracterización de la congestión vehicular para Medellín y aproxima una medida de congestión comparando el tiempo de desplazamiento entre horas pico y valle, además de contrastarlo con referentes internacionales. La tercera se concentra en el marco teórico, donde además de presentar el efecto de la implementación de un impuesto Pigoviano, hace una revisión de los lineamientos teóricos relacionados con el tema de estudio y presenta una revisión de las experiencias internacionales de Londres, Singapur, Estocolmo, México y Chicago. Por su parte, la sección cuatro presenta la metodología a utilizar. La quinta analiza los principales resultados de la evidencia empírica y por último se concluye.

## **2. Caracterización de la congestión vehicular en Medellín**

La ciudad de Medellín es la capital del departamento de Antioquia y es la segunda ciudad más importante de Colombia después de Bogotá, cuenta con una extensión de 105 kms<sup>2</sup> de suelo urbano, 270 kms<sup>2</sup> de suelo rural, 2.121 kms de carreteras y 5,2 kms<sup>2</sup> de suelo para expansión. En el caso de Medellín(y en el de otras principales ciudades colombianas), cuatro factores se encuentran, al parecer, entre los principales determinantes del incremento en el número de vehículos que circulan allí y la congestión actual: los altos índices de urbanización, el aumento del ingreso real *per* cápita, la reducción del precio real de los

automotores y la mayor facilidad de acceder a créditos de compra de vehículos (Medina y Vélez, 2011). Derivado de ello, los niveles de contaminación y el tiempo de transporte requerido para recorrer un mismo número de kilómetros se han incrementado sustancialmente.

Para poder caracterizar el problema de congestión que hay en la ciudad es necesario analizar diferentes indicadores que permitan dar cuenta de ello. Estos indicadores son la tendencia de crecimiento del parque automotor, el tiempo de viaje promedio en la ciudad y la inversión en infraestructura en el sector transporte.

El primer aspecto que se analiza es el parque automotor, ya que la cantidad de automóviles y motocicletas que circulan en la calles de la ciudad influyen directamente en la generación de situaciones de congestión vehicular. De acuerdo con la información presentada en la Tabla 1 el parque automotor circulante estimado en la ciudad de Medellín presenta una tendencia creciente, pues pasó de 700.000 automotores en 2007 a 1'234.946 en 2014, siendo los años 2009 y 2010 los que presentaron las tasas de crecimiento más altas, 11.3% y 9.6% respectivamente. Este ritmo de crecimiento disminuyó drásticamente en el año 2014 pues el parque automotor creció a una tasa de 4.5%; a pesar de que el porcentaje de crecimiento es menor en comparación con años anteriores significó 53.129 automotores más circulando en la ciudad (Medellín Cómo Vamos, 2012, 2014a).

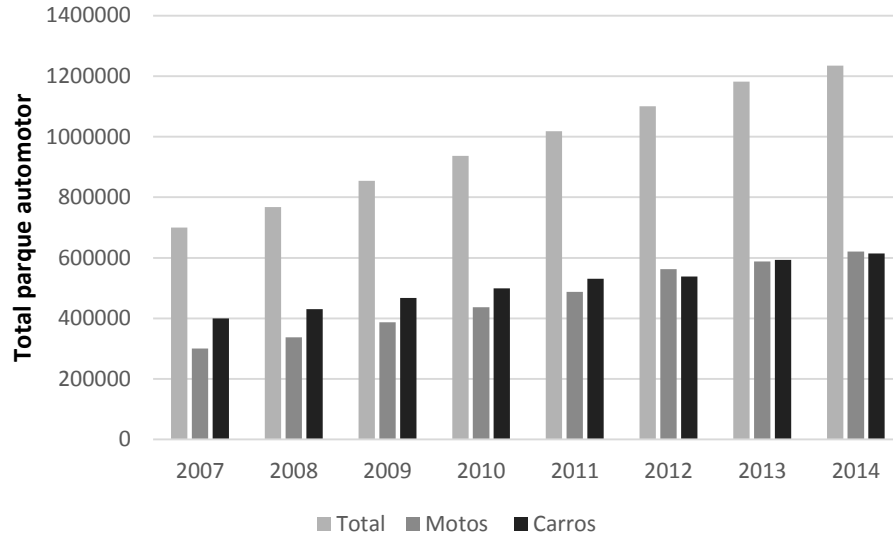
Simultáneamente al crecimiento en el parque automotor se presentó un cambio en la composición de este. En el Gráfico 1 se observa el aporte que hacen tanto motos como automóviles al total de automotores circulantes estimados entre los años 2007 y 2014 en la ciudad de Medellín. Es importante notar como desde 2007 hasta 2011 hay una marcada supremacía en la cantidad de carros en comparación de motos; sin embargo, en 2012 hay un cambio de tendencia en este comportamiento, ya que el número de motocicletas pasa a tener mayor participación en el total de automotores circulantes en la ciudad, logrando para 2014 tener un parque automotor compuesto por 620.612 motocicletas y 614.334 automóviles.

**Tabla 1 Medellín Parque automotor circulante estimado: 2007-2014**

<b>Año</b>	<b>Total</b>	<b>%Crecimiento</b>	<b>Motos</b>	<b>% Crecimiento</b>	<b>Carros</b>	<b>%Crecimiento</b>
<b>2007</b>	700000	-	300000	-	400000	-
<b>2008</b>	767548	9,6%	337477	12,5%	430071	7,5%
<b>2009</b>	854473	11,3%	386941	14,7%	467532	8,7%
<b>2010</b>	936365	9,6%	437270	13,0%	499095	6,8%
<b>2011</b>	1018257	8,7%	487600	11,5%	530657	6,3%
<b>2012</b>	1100148	8,0%	562219	15,3%	537929	1,4%
<b>2013</b>	1181817	7,4%	588258	4,6%	593559	10,3%
<b>2014</b>	1234946	4,5%	620612	5,5%	614334	3,5%

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe Calidad de Vida Medellín 2012 y 2014*

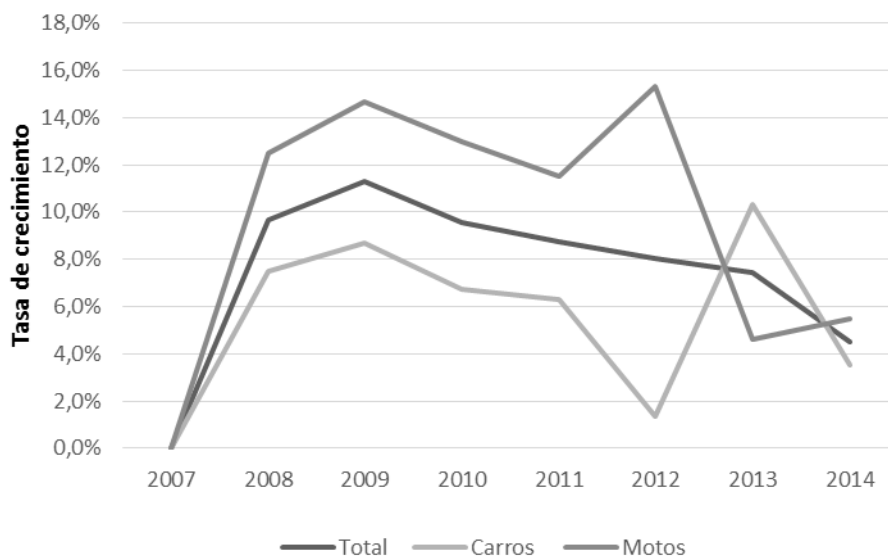
**Gráfico 1 Medellín parque automotor circulante estimado**



*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe Calidad de Vida Medellín 2012 y 2014*

A pesar del cambio en la composición del parque automotor mencionado anteriormente, dicha situación no es exclusiva de un periodo tiempo en particular (2012-2014), sino que es resultado de una tendencia que se venía presentando desde años anteriores, pues como se puede observar en la Tabla 1 la tasa de crecimiento del número de motos que circulan en la ciudad es en promedio 11% mientras que para los automóviles el promedio de la tasa de crecimiento es 6%.

**Gráfico 2 Tasa de crecimiento parque automotor circulante estimado**



Por otro lado de acuerdo con la Encuesta Origen Destino 2012 cerca del 50% de los automóviles del Valle de Aburrá se encuentran concentrados en cuatro zonas del Área Metropolitana. La comuna de El Poblado con 20% de automóviles del total de la ciudad es la que más aporta a este rubro seguido por Laureles, Belén y Envigado, en promedio cada una de estas zonas participa con el 10% de automóviles de la ciudad. Además, si se tiene en cuenta que según la EOD 2012, el 47% de los viajes realizados en la ciudad tienen como motivo el regreso a casa, se puede intuir que estas zonas, en especial la de El Poblado deben presentar problemas de congestión vehicular, fundamentalmente en la hora pico de la tarde por la cantidad de viajeros que regresan a su residencia utilizando su automóvil particular.

El segundo aspecto a tener en cuenta es el tiempo de viaje promedio en la ciudad, ya que según de Rus Mendoza, Méndez & Merchán (2003) el tiempo de viaje es uno de los principales determinantes de la demanda individual de transporte, pues representa el costo de oportunidad de estar en las calles en comparación con el tiempo que puede ser invertido en ocio o en trabajo. Adicional a esto, el tiempo de viaje resulta ser la manera en que los viajeros perciben la congestión, ya que aumentos representativos en el tiempo de sus recorridos cotidianos están relacionados con el incremento de vehículos en las vías.

De acuerdo con los datos del documento *Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad (2012)*, basados en la EOD 2012, el tiempo promedio de viaje en septiembre de ese año en el Valle de Aburrá fue de 33 minutos, un 32% más alto que el del año 2005, cuando era de 25 minutos. Por otra parte, *Medellín Cómo Vamos (2014)* en su informe de percepción ciudadana destaca el aumento del porcentaje de personas que declaran incrementos del tiempo de viaje en sus recorridos habituales, ya que pasó de 21% de los encuestados en 2013 a 41% en 2014. Ambos trabajos dan cuenta de aumentos en el tiempo de viaje promedio en la ciudad, si a esto se le suma el incremento del parque automotor presentado anteriormente, es posible notar que los dos indicadores tratados hasta ahora están arrojando resultados que son propios de una situación de congestión vehicular.

La infraestructura es otro de los elementos que se debe tener en cuenta para caracterizar un problema de congestión vehicular, en este caso, se va a utilizar la inversión en transporte hecha por las autoridades encargadas como variable que represente el estado de la infraestructura en la zona de estudio.

Acorde con lo presentado en el documento de *Medellín Cómo Vamos (2014a)* el ítem de transporte fue el segundo en acaparar más inversión en la ciudad, pues significó el 15.7% del total invertido (\$735.824 millones de \$4,7 billones), siendo superado únicamente por la inversión realizada en el sector de la educación. Ahora bien, en comparación con las grandes ciudades de Colombia, Medellín es la segunda ciudad del país que más invirtió en el sector transporte; sin embargo, se ubica en primer lugar si la inversión se mira en términos per cápita. Los recursos fueron destinados principalmente en el mejoramiento del sistema de transporte masivo, seguido por inversión en estudios y pre-inversión en infraestructura,

construcción de vías, mejoramiento y rehabilitación de vías, planes de tránsito y por último infraestructura para transporte no motorizado. De esta inversión realizada en el sector transporte se destacan dos grandes inversiones, en primer lugar están las obras del Metroplus, las cuales pertenecen al ítem de transporte masivo, en segundo lugar están las obras de valorización en el sector del El Poblado y la construcción del puente de la Madre Laura, las cuales hacen parte de la inversión destinada a la creación de nuevas vías.

**Tabla 2 Inversión en transporte per-cápita en Medellín**

<b>Principales rubros</b>	<b>2012</b>	<b>%</b>	<b>2013</b>	<b>%</b>	<b>2014</b>	<b>%</b>
<b>Ampliación</b>						
Construcción de vías	31.165		46.774		21.289	
Sistema de transporte masivo	50.310		84.908		217.887	
Infraestructura para transporte no motorizado	2		623		5.634	
Estudios y pre inversión en infraestructura	36.757		9.703		30.412	
Subtotal	118.234	<b>89%</b>	142.008	<b>80%</b>	275.222	<b>93%</b>
<b>Mantenimiento</b>						
Mejoramiento y rehabilitación de vías	5.173		9.023		2.973	
Mantenimiento rutinario y periódico de vías	454		17.108		12.804	
Planes de tránsito, educación, dotación de equipos y seguridad vial	8.897		8.651		5.770	
Subtotal	14.524	<b>11%</b>	34.782	<b>20%</b>	21.547	<b>7%</b>
<b>Total</b>	<b>132.758</b>	<b>100%</b>	<b>176.790</b>	<b>100%</b>	<b>296.769</b>	<b>100%</b>

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del informe Calidad de Vida Medellín 2012 y 2014*

A pesar de que la inversión en sistema de transporte masivo y construcción de nuevas vías han representado el mayor gasto en infraestructura del sector transporte, estos rubros han perdido protagonismo debido a la calidad de la malla vial que en los últimos años se ha visto disminuida. En efecto, el porcentaje de calles en estado deficiente ha pasado de ser 21,9% en el año 2012 a 33,5% para el año 2014 (Medellín Cómo Vamos, 2014a) lo cual es preocupante debido a que el parque automotor sigue creciendo y la ciudad se sigue expandiendo.

En resumen, los tres indicadores han entregado resultados negativos. Por parte del parque automotor se concluye que este sigue creciendo, lo cual implica más automóviles y motocicletas circulando en la ciudad, esta situación influye directamente en el tiempo promedio de viaje, este aumento del tiempo de viaje representa costos que son asumidos por los viajeros, es decir, los perjudica. Si a estas dos situaciones se le adiciona una infraestructura que no es eficiente y parte de ella no está en buen estado, se presenta un problema de congestión vehicular, ya que según de Rus Mendoza, Méndez, & Merchán, (2003: pp 121) :

*La congestión se produce cuando, como consecuencia de las limitaciones de capacidad de alguna infraestructura, la presencia de usuarios adicionales hace*

*aumentar los costes (principalmente, de tiempo) que soportan la totalidad de los usuarios de la infraestructura.*

En este sentido dada la limitación de la infraestructura, la medida del “Pico y placa” ha sido uno de los mecanismos utilizado por la autoridad en materia de movilidad de la ciudad de Medellín para controlar los problemas de congestión vehicular específicamente en las horas pico que comprendían inicialmente los horarios de 6:00 am a 9:00 am y de 5:00 pm a 7:00 pm, las cuales fueron reducidas en la actualidad entre las 7:00 am a 8:30 am y de 5:30 pm a 7:00 pm. De acuerdo con Gonzales-Calderon (2009) la medida es pertinente en el corto plazo, pero poco efectiva en el mediano y largo plazo, debido a que la restricción de circulación para un número determinado de vehículos durante dos días en la semana en los horarios mencionados anteriormente, ha incentivado a los ciudadanos a demandar más vehículos, lo que ha aumentado tanto el número de automóviles como de motos que circulan en la ciudad, situación que agrava el problema de congestión ya existente. Por otra parte el peaje por congestión es planteado como una medida complementaria al “Pico y placa” ya que traería beneficios en términos de la disminución de vehículos que circulan en la ciudad, además incrementaría los ingresos de la Administración municipal debido al cobro de la tarifa, dinero que puede ser utilizado para mejorar el sistema de transporte.

González-Calderón, Henao & Sánchez-Díaz (2012) se encargaron de demostrar que el “Pico y placa” es una medida paliativa y no soluciona el problema de congestión en el largo plazo, razón por la cual es válido la implementación del peaje por congestión que en teoría es una herramienta adecuada, pues por medio de ella se puede maximizar el bienestar social.

### **2.1 Tiempo como indicador de congestión.**

Los indicadores mencionados anteriormente permiten analizar como diferentes factores han contribuido a la generación de situaciones de congestión para la ciudad de Medellín. Es claro que el tiempo de viaje ha incrementado, que hay tendencia creciente en el parque automotor y la inversión en la infraestructura en transporte no ha sido suficiente para mejorar la situación de congestión vehicular, por lo que es necesario pensar en mecanismos complementarios que permitan solucionar dicha situación. No obstante, es importante comparar a Medellín con otras ciudades del mundo que presentan problemas de congestión, con el objetivo de revisar como está la ciudad en este tema. Para esto se tendrán en cuenta las 5 ciudades más congestionadas del mundo y las ciudades que son más citadas como referentes internacionales para corregir el problema de congestión. Es importante tener en cuenta que cada ciudad presenta un contexto particular que hace de su situación única, pero un indicador adecuado de comparación es la diferencia entre el tiempo de desplazamiento promedio en una situación de congestión y una situación libre de congestión(Russo, 2015).

La información presentada a en la tabla 3 hace parte del *TomTom Traffic Index* para el año 2015, este indicador se basa en el tiempo de viaje durante todos los días del año, diferenciando entre el tiempo promedio de viaje cuando hay situaciones de congestión (hora pico) y el tiempo promedio de viaje en situaciones libres de congestión(hora valle).



**Tabla 3. Ranking de ciudades más congestionadas del mundo**

<b>Ranking</b>	<b>Ciudad</b>	<b>Nivel de congestión(Tiempo extra)</b>	<b>Malla vial km</b>
1	Ciudad de México	59%	55.419
2	Bangkok	57%	40.837
3	Łódź	54%	3.271
4	Estambul	50%	18.178
5	Rio de Janeiro	47%	20.211
20	Londres	38%	48.952
64	Singapur	31%	8.518
84	Estocolmo	29%	7.630
126	Chicago	26%	46.735

*Fuente: Elaboración propia a partir de The TomTom Traffic Index*

De acuerdo con la tabla3 Ciudad de México es la ciudad más congestionada del mundo, la diferencia entre el tiempo de viaje en una situación de congestión en comparación con una situación de no congestión, es de 59%, este número indica el tiempo adicional que se tardan los individuos en desplazarse cuando la ciudad se encuentra congestionada. En segundo lugar se encuentra Bangkok, esta ciudad tiene un incremento de 57% en el tiempo de desplazamiento, seguido por Łódź, la cual presenta incrementos de 54%. El top 5 del ranking lo completan Estambul y Rio de Janeiro con 50% y 47% de tiempo extra respectivamente. Seguido por Londres con 38% de tiempo extra, Singapur con 31% y Estocolmo con 29% ocupan las posiciones 20, 64 y 84 de este ranking, estas ciudades tienen en común los peajes urbanos de congestión, esto implica, que los niveles de congestión podrían ser mucho más altos si no se contara con esta medida. Finalmente, en la posición 126 se encuentra Chicago, ciudad que tiene 26% de tiempo extra en sus desplazamientos y como se mostrará más adelante se encuentra estudiando medidas que le permitan mejorar la movilidad de la ciudad.

Medellín no aparece en el estudio propuesto por *TomTom International BV*; no obstante, se usa la información disponible con el objetivo de comparar a Medellín con las ciudades mencionadas anteriormente. Es importante señalar que la información con la que se cuenta es reducida, pues no hay datos consolidados sobre el tiempo de desplazamiento promedio en situaciones de congestión en comparación con situaciones de no congestión. La información disponible no se recolecta año tras año, ni tampoco hace un seguimiento diario de vehículos para medir su tiempo de desplazamiento.

Teniendo en cuenta estas limitaciones se utiliza información subministrada por la secretaría de movilidad de Medellín para el año 2013. Esta información clasifica la velocidad promedio, tiempo promedio de viaje y distancia recorrida por los automotores en diferentes corredores viales de la ciudad en tres horarios diferentes, la información fue recolectada entre los meses de Octubre y Noviembre de 2013 y cada corredor vial fue observado durante 5 días aproximadamente. Para la situación de congestión se tendrá en cuenta el periodo de tiempo entre las 5:00 pm y las 7:00 pm y la situación libre de congestión estará comprendida entre las 11:00 am y las 2:00 pm. Se tomó el promedio de la distancia de los diferentes corredores viales que fueron estudiados y se encontró una distancia promedio de 2.798 kilómetros, para

recorrer esta distancia en una situación de no congestión en promedio se requieren de 9 minutos y para una situación de congestión se necesitan en promedio 12 minutos. Siguiendo el método utilizado por *TomTom International BV* para medir la congestión, es necesario 33% más de tiempo para recorrer 2.798 kilómetros en horas pico comparativamente con la hora valle, este porcentaje corresponde a tres minutos extras invertidos por kilómetro.<sup>1</sup>

A pesar de que la metodología utilizada para medir el nivel de congestión para Medellín no es tan precisa como la presentada en el *TomTom Traffic Index*, permite confirmar la tendencia encontrada con los indicadores mencionados anteriormente, es decir, se confirma la presencia de congestión vehicular en Medellín. Es importante resaltar que uno de los indicadores más acertado utilizado en la literatura de Economía de Transporte para medir la congestión hace alusión al tiempo de desplazamiento que tarda para movilizarse de un lugar a otro (Zhao, an, & Wang, 2010) (Yang, 1999) (Evans, 1992)(Prat, 2004) . Por otra parte, es posible comparar Medellín con ciudades del mundo en las cuales hay problemas de congestión vehicular, esto se hace con el objetivo de justificar herramientas que permitan mitigar el problema detectado, pues lo ideal es proponer soluciones antes que se llegue a niveles de congestión como los de Ciudad de México o Bangkok, cuyos costos son mayores, por ejemplo, vía contaminación.

### **3. Marco teórico y revisión de literatura**

El término congestión puede ser definido desde dos perspectivas, una teórica que está relacionada con aspectos más técnicos, y otra económica que trata el tema como una externalidad y analiza el problema desde la economía del bienestar. Según Tyler, Bohórquez, Suescún & Velásquez ( 2013:pp7)

*La congestión desde un punto de vista teórico puede definirse como la relación entre la capacidad de una infraestructura de transporte y el número de vehículos que desean transitar por ella. En el momento en que el ingreso de un vehículo adicional en la vía estorba el desplazamiento de los demás, comienza la situación de congestión. La congestión se intensifica a medida que la cantidad de vehículos en la vía aumenta y esto lo experimentan los usuarios de las vías mediante mayores incrementos en su tiempo de viaje.*

Por otra parte se tiene el problema de la congestión visto desde la teoría económica, en donde esta situación se da debido a que los usuarios no internalizan el costo que generan al usar la vía, pues sienten que son víctimas de la congestión y no actores directos de ella, razón por la cual de Rus, Méndez & Merchán (2003: pp 13) la definen como:

*Un fenómeno que se produce principalmente en el transporte en automóviles privados. La externalidad se produce porque cada usuario, al tomar su decisión de utilizar una carretera, sólo tiene en cuenta el coste que le supone el tiempo que va a emplear en el viaje, más el coste monetario de utilización del vehículo, pero no valora que al circular con su automóvil está haciendo que el tráfico sea menos fluido para todos los usuarios. Por tanto, el último usuario que entra en una carretera congestionada*

---

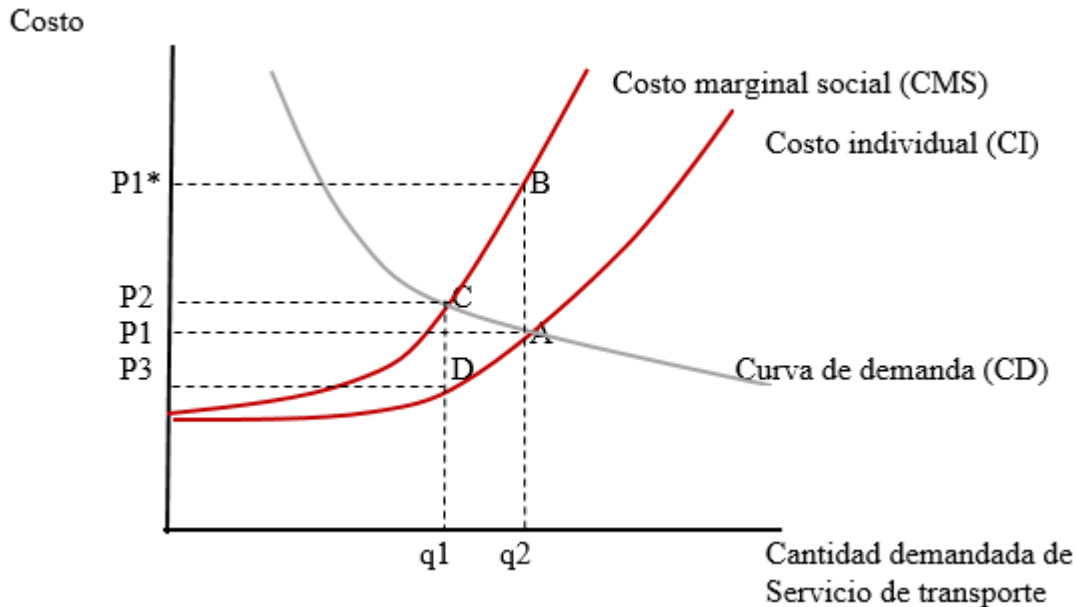
<sup>1</sup> En el Anexo 2 se presentan los indicadores que tradicionalmente se han utilizado para medir congestión vehicular. Esta información solamente se pudo obtener a nivel de país, lo que hace que no sea comparable.

*está imponiendo un coste en términos de tiempo extra al resto de automóviles en la carretera que ese usuario no paga.*

La principal variable en los costos de congestión radica en el valor del tiempo de los usuarios para sus desplazamientos, compuesto por dos aspectos, el primero conocido como el costo individual, que puede definirse como lo que le cuesta a cada individuo el tiempo de movilizarse por la red de transporte, y el segundo corresponde al costo social, que se refiere al costo para toda la sociedad, y el cual se genera a partir de la suma de los costos individuales y el que estos generan al resto de la sociedad por congestionar la red de transporte (Prat, 2004; Asensio & Matas, 2008). El costo individual de la congestión hace que el individuo esté dispuesto a asumir un costo de uso de su medio de transporte mayor al que soportaría en ausencia de la solución al problema de congestión con el fin de desplazarse más rápido. Este incremento en el costo individual del uso de su medio de transporte asociado a la solución del problema de congestión se denomina el cargo por congestión.

Esto puede observarse en el Gráfico 3, donde el punto A representa el costo individual (CI) con un costo  $P1$ . El punto B representa el costo marginal social (CMS), con un costo  $P1^*$ . El punto C hace alusión al caso en el cual los usuarios del sistema internalizan los costos por congestión, pagando un  $P2$ , el cual es mayor que el costo individual  $P1$ . La diferencia entre  $P2$  y  $P3$  corresponde al cargo por congestión para realizar una asignación óptima de los recursos, correspondiente a los beneficios que obtiene la sociedad por la utilización de infraestructura de la red de transporte.

**Gráfico 3 Diagrama costo marginal social.**



Fuente: Tyler et al., 2013.

A pesar de que en los últimos años ha sido más evidente el problema de la congestión vehicular, éste venía preocupando a economistas desde tiempo atrás. Pigou (1920) en su libro *Economics of Welfare* fue quien pensó inicialmente este problema (que parece tan propio del campo de la ingeniería) en términos económicos. Propuso abordar la congestión vehicular como un problema tal que los agentes no internalizaban el costo que le generaban a la sociedad al usar su vehículo. Para solucionar este problema era necesario que los usuarios internalizaran el costo social por medio de un impuesto. Basados en esta premisa se inició toda una línea de estudio en la cual se destacaron Vickrey (1969) con su trabajo *Congestion theory and transport investment*, Walters (1961) con *The theory and measurement of private and social costs of highway congestion* y Downs (1962) con *The law of peak-hour expressway congestion*. A partir de tales estudios conceptos como racionalidad y optimización empezaron a ser tenidos en cuenta para modelar el comportamiento de los usuarios, y se acentuó la motivación para construir funciones matemáticas que representen el comportamiento de los agentes, suponiendo que buscan maximizar una función de utilidad sujeta a restricciones presupuestales.

En el proceso de representar desde el punto de vista de la economía la situación a la que se enfrentan los agentes cuando deben afrontar la congestión vial surgió el trabajo de Arnott, de Palma & Lindsey (1993) titulado *A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand* que buscaba corregir algunas falencias encontradas en Vickrey (1969) por medio de un modelo estructural que tomara en cuenta la tecnología y el comportamiento al tomar decisiones por parte de los usuarios. Arnott et al. (1993) exponen cómo interactúan las decisiones de los usuarios y la valoración del tiempo en el problema de la congestión vehicular. Se parte de que los usuarios son racionales y, por lo tanto, buscan maximizar su utilidad, por lo cual desean pasar el menor tiempo posible en embotellamientos, pues esto les genera un costo el cual se representa en tiempo de viaje y dinero. Para minimizar este costo deben tomar la decisión entre salir o no en la hora pico; por lo tanto deben tener información acerca del estado de la carretera y de acuerdo a la valoración que tengan de su tiempo decidirán si lo gastan en un embotellamiento o si retrasan su hora de salida logrando de esta manera reducir su tiempo de viaje.

Por otro lado, Deaton & Muellbauer (1980) en su modelo casi ideal de demanda fundamentan a nivel teórico y aplicado a partir de una función de demanda (Marshalliana o Hicksiana) cómo obtener la elasticidad precio de la demanda, la elasticidad precio cruzada de la demanda y la elasticidad gasto o ingreso. Esto es importante para nuestra investigación por que en la medida que pueda haber una sustitución entre los diferentes medios de transporte, los agentes lo van a realizar, dejando claro que el transporte público se trata de un bien necesario, pero que en la medida que los agentes perciben mayores ingresos es muy probable, que en vez de utilizar el transporte público pueden utilizar el transporte privado conllevando a mayores niveles de congestión vehicular.

Los esfuerzos por investigar el tema de la congestión y encontrar soluciones desde las herramientas que brinda la economía han sido de tipo teórico y aplicado. Cada caso ha sido abordado y tratado con especial cuidado, pues cada territorio tiene características que diferencian los proyectos ya sea en su implementación o ejecución; a pesar de estas

diferencias tienen en común que están apoyados teóricamente en los postulados de Pigou. Por otra parte, los casos internacionales que se presentan a continuación demuestran que la inversión en infraestructura, en particular la construcción de nuevas vías, debe ser una medida complementaria a los mecanismos basados en precios y en ningún momento son la única solución al problema de congestión vehicular.

Las aplicaciones más reconocidas han tenido lugar en Londres y en Singapur, en donde la implementación de cobros por congestión logró dar solución a los problemas de movilidad sufridos en estos territorios. Sin embargo, como lo describe Litman (2006), no solo basta con imponer un precio, sino que es necesario crear un entorno adecuado que garantice el éxito del mecanismo; esto incluye inversión en infraestructura, en transporte público, la creación de nuevas rutas, el incentivo a usar medios de transporte alternativos como las bicicletas y sobre todo el manejo transparente y adecuado de los recursos obtenidos gracias al sistema.

### **3.1. Experiencias internacionales.**

#### **Londres**

El esquema planteado para Londres ha llamado la atención en el mundo, pues tuvo lugar en una gran ciudad donde el problema de congestión estaba influyendo negativamente en las dinámicas cotidianas de los ciudadanos. Londres era el escenario ideal para la implementación de un sistema de cobro por congestión puesto que sus vías estaban llegando al límite de capacidad, lo que generaba disminución en la velocidad de desplazamiento y aumentos significativos en los tiempos de viaje, en especial en la zona central de la capital inglesa, lo particular de esta situación es que a pesar de que los ciudadanos contaban con alternativas de desplazamiento: taxis, buses, Subway y caminar, la opción de viajar en automóvil era la más demandada entre los londinenses, razón por la cual el problema de congestión vehicular en el centro de la ciudad se había agudizado (Litman, 2006).

El proceso mediante el cual se logró implementar el cobro por congestión inició en el año 2000 gracias a los poderes especiales concedidos al alcalde Kevin Livingstone; sin embargo, fue hasta Febrero del año 2003 cuando inició el funcionamiento del cobro. El sistema se implementa en un área de 22 kms cuadrados que forma un cordón, el cual es intensivo en cámaras de seguridad aprovechando la infraestructura ya existente en la ciudad, el valor que se debe pagar para entrar en esta área es de 8£.

El mecanismo implementado a pesar de su éxito ha sido criticado sobre todo en la parte de su funcionamiento, pues no contempla una tarifa flexible que esté acorde con los niveles de congestión que se presentan en cada hora. En términos generales el proyecto fue un éxito donde sus principales logros han llevado a que la velocidad media de los automóviles en la zona de congestión durante los días en los que se cobra la tarifa incrementó 37%. Antes del peaje la velocidad promedio de los vehículos en la zona era de 13km/h; después de implementarse la tarifa la velocidad promedio de los vehículos en la zona se incrementó a 17km/h. Aproximadamente 110.000 automovilistas por día pagan la tarifa, de los cuales 98.000 son conductores individuales y 12.000 son con vehículo compartido. Cerca de un millón de personas entran al centro de Londres durante la hora pico en la mañana (7-10 am);

más de 85% de estos viajes se hacen en transporte público; antes de implementarse la tarifa de congestión aproximadamente 12% de los viajes en el periodo de hora pico se hacían en automóvil particular. Los retrasos en la hora de congestión disminuyeron 30%; los retrasos en buses en la hora de congestión disminuyeron 50%; el número de pasajeros de los buses se incrementó 14%; el de los pasajeros en el *Subway* aumentó 1% y finalmente los costos de transporte se redujeron en un intervalo de 20% a 40% gracias a la reducción en las demoras ocasionadas por la congestión.

### **Singapur**

El cobro por congestión establecido en Singapur conocido como *Electronic Road Pricing* (ERP) es uno de los principales referentes como ejemplo exitoso de políticas que ataquen el problema de la congestión vehicular (Pozueta, 2008, Prat, 2004, Goh, 2002). El ERP es resultado de un proceso de diversas medidas que implementaron las autoridades de Singapur a partir de 1972 con la intención de mitigar el creciente problema de congestión en la zona más dinámica de la ciudad. Se inició con impuestos sobre la posesión de automóviles, posteriormente se implementó un sistema de licencias por áreas ALS (por sus siglas en inglés) para finalmente instaurar el ya mencionado ERP en 1998.

El sistema de cobro funciona en el centro o núcleo de la ciudad, donde se presentaban altas tasas de vehículos motorizados, territorio reducido, alta densidad de la población y altos niveles de congestión. El sistema se implementa en un área de 7,2 kms cuadrados, funcionando de lunes a viernes de 7:30-18:30 y los sábados con un horario de 10:15-14:00. El peaje tiene un valor medio de 1,5 € por entrada y cambia de acuerdo con el lugar y la hora. Tienen exenciones para entrar al lugar los vehículos de emergencia y los de transporte público. Uno de los aspectos más importantes que tiene en cuenta el ERP es la fluctuación de las tarifas de cobro pues como describe Pozueta (2008) estas son revisadas cada 3 meses, teniendo en cuenta las velocidades medias de los vehículos.

### **Estocolmo**

El sistema que fue implementado en esta ciudad Sueca entró en funcionamiento a partir de Agosto de 2007 afectando un área de 50 kms cuadrados, esta medida al igual que en los casos citados anteriormente buscaba reducir la congestión vehicular, mejorar la movilidad y tener un impacto positivo sobre el medio ambiente. A pesar de que los objetivos que tiene el sistema de cobro en esta ciudad no son diferentes a los objetivos presentados en los casos de Londres y Singapur la forma en cómo se implementó el sistema es un diferenciador importante que caracteriza la filosofía bajo la cual funciona el cobro.

A pesar de que la medida fue instaurada en Agosto de 2007 esta había estado en pruebas desde Enero de 2006 hasta Julio del mismo año, para posteriormente someter su continuidad a votación por medio de un referéndum, cuyo resultado fue el sí a favor del cobro por congestión. Eliasson (2008) y Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij (2012) enmarcan el éxito del mecanismo bajo múltiples aspectos, por un lado señala ganancias en tiempos de viaje y disminución en el flujo vehicular; sin embargo, el aspecto más interesante que se expone es la confianza de los ciudadanos hacia las autoridades encargadas de la

administración y funcionamiento del sistema de cobro, pues el dinero que fue percibido gracias a este fue invertido en mejoramiento de transporte público y mantenimiento de vías, logrando de esta manera la aceptación del sistema como el método adecuado para enfrentar la congestión vehicular (Eliasson & Jonsson, 2011; Börjesson, Eliasson, & Hamilton, 2016).

**Tabla 4 Indicadores de sistemas de cobro de congestión**

CIUDAD O PAÍS	SISTEMA	TARIFA	REDUCCIÓN TRÁFICO	VELOCIDAD
Londres	Peaje Zonal con diferentes formas de pago en su mayoría electrónicas (2003)	Es una tarifa plana. Inicialmente costaba £5, pero aumentó a £8 desde 2008	-El tráfico se reduce en 15%. -Los retrasos en la hora de congestión disminuyeron 30%.	La velocidad promedio pasa de 13km/h a 17km/h.
Singapur	Electronic Road Pricing (1998)	Es una tarifa variable de acuerdo a la hora y el vehículo, sin embargo el máximo es de 1,7€	EL tráfico se reduce entre 13% y 15%	El sistema es variable; sin embargo se tienen velocidades de referencia las cuales están entre 20Km/h y 30 Km/h
Estocolmo	Peaje por congestión introducido temporalmente en 2006; luego se dejó definitivamente después de referéndum en 2007	Es una tarifa variable, puede costar 2€, 1,5€ o 1€ de acuerdo a la hora del viaje; se debe pagar tanto al entrar como al salir	-El tráfico se ha reducido entre 20% y 24% - El tráfico comercial ha reducido en 15% -Las colas se han reducido en un 50%	La velocidad de referencia para hacer cambios en los precios de peajes es de 13Km/h.

*Fuente: Elaboración propia a partir de Pozuela (2008), Matas (2004) y Börjesson, Eliasson, Hugosson, & Brundell-Freij (2012)*

### México

Otro caso internacional que resulta interesante analizar es el de Ciudad de México, ya que por un lado, está calificada como la peor ciudad con problemas de congestión en el mundo (Litman, 2012) y, por otra parte, es una ciudad Latinoamericana, esto implica que puede llegar a presentar un contexto mucho más similar al de Medellín, si se compara con lugares como Londres, Singapur o Estocolmo.

Las razones por las cuales Ciudad de México presenta problemas de movilidad no distan mucho de lo exhibido para Londres, Singapur y Estocolmo, pues los problemas en el sector transporte que presenta esta ciudad de Centro América son: congestión vial y de estacionamiento, accidentes de tránsito y problemas por emisiones contaminantes (Litman, 2012). Estos problemas son causados por diferentes motivos, entre ellos están la baja calidad de los modos alternativos de transporte y su correspondiente infraestructura, la tendencia creciente del parque automotor, los altos costos de mantenimiento y expansión de infraestructura y las políticas fallidas de corto plazo como el *Pico y Placa* que al contrario de lo que se esperaba, incentivó la compra de un segundo vehículo por hogar, agudizando así el problema de congestión que se suponía debía combatir (Medina & Velez, 2011).

Para solucionar este problema Litman (2012) propone hacer uso de una herramienta denominada *Gestión de la Movilidad*, en la cual se combinan como parte de una sola política múltiples estrategias que atacan el problema de la congestión desde diferentes ángulos. Lo anterior quiere decir que se tomarán medidas que impacten la infraestructura, como por ejemplo inversión en transporte masivo, pues transporte público de calidad desincentivará el viaje en automóvil privado. Por otra parte es importante estimular el uso de medios alternativos de transporte como la bicicleta y la caminata, paralelo a esto se deben implementar medidas de precios eficientes para zonas de alta congestión vehicular. Por último, es necesario contar con instituciones transparentes, que manejen adecuadamente los recursos destinados a mejorar la movilidad en la ciudad. En resumen, este plan de *Gestión de la Movilidad* tiene como objetivo la reducción de viajes en automóvil privado, para lograr este objetivo es necesario aplicar un plan integral, en el cual se combinen políticas dirigidas a los múltiples factores que afectan la decisión de viajar en automóvil, esto se hace bajo la premisa de que los resultados serán mejores si se aplican estas políticas conjuntamente.

### **Chicago**

Una de las alternativas más interesantes para enfrentar el problema de la congestión es la que está proponiendo Chicago en su plan integral llamado *GO TO 2040*. En primer lugar se parte de la premisa de que la movilidad es el motor de la economía regional, por lo cual es necesario invertir en el mantenimiento y la modernización del sistema de transporte, con la intención de garantizar un mejor nivel de calidad de vida para sus habitantes, al tiempo de proporcionar escenarios para que la economía sea dinámica y competitiva (Chicago Metropolitan Agency for Planning, 2012).

Al igual que en los otros casos expuestos anteriormente, las autoridades de Chicago han identificado problemas de congestión en algunas zonas o rutas de la ciudad, debido a un sostenido crecimiento del parque automotor, al intensivo uso del automóvil y al deterioro de la antigua infraestructura. La Agencia Metropolitana de Planeación de Chicago (CMAP por sus siglas en inglés) en su plan integral *GO TO 2014*, está proponiendo una serie de medidas con el objetivo de transformar su sistema regional de transporte en un sistema moderno para competir en la economía global. Este plan se concentra en cuatro grandes tópicos: Inversión estratégica, carreteras, tránsito y fletes. Para efectos de esta investigación, se destaca una de las propuestas utilizadas en el tópico de carreteras, en particular se trata de la tarifa de congestión.

En Chicago se desea implementar tarifas de congestión, pero a diferencia de lo realizado en Londres o Singapur, en esta ciudad no habrá una zona o cordón que esté bajo algún cobro. Sin embargo, si comparte la idea de incentivar al uso del carro compartido, el cambio de rutas y horarios de viaje. El sistema será sencillo, se busca implementar carriles rápidos, utilizando en algunos casos la infraestructura ya existente y construyendo vías en otras ocasiones. El uso del carril rápido tendrá un costo, el cual, será pagado por aquel que valore más su tiempo y tenga la necesidad de llegar con más prisa a algún lugar. De esta manera se verán beneficiados tanto los que usen la carretera tradicional como los que decidan pagar por el uso del carril rápido, pues en ambos casos hay ganancias en términos de tiempos de viaje.



#### 4. Metodología

Siguiendo a Train (2003) un modelo de elección discreta es un modelo que se encarga de describir las elecciones que hacen los agentes entre diferentes alternativas. En particular para este trabajo, los agentes deben elegir entre utilizar el Metro, Automóvil privado, bus u otro medio de transporte, para realizar sus viajes o desplazamientos hacia su lugar de trabajo. Este tipo de modelo permitiría articular la teoría sobre impuestos Pigouvianos con el problema de congestión vehicular para una ciudad en particular, pues es posible observar como un set de covariables influyen en la decisión que toman los agentes respecto al modo de transporte que eligen para realizar sus desplazamientos, adicionalmente se puede estudiar como la modificación de alguna de las covariables, manteniendo las otras constantes afectan la elección del medio de transporte por parte de los agentes.

Todo modelo de elección discreta tiene tres características comunes: La existencia de un conjunto de elección, probabilidades de elección asociadas a las diferentes alternativas y una especificación o forma del modelo.

El conjunto de elección no es más que el conjunto que enmarca todas las alternativas posibles de las que se puede valer un agente en determinada situación. Para asegurar la existencia de este conjunto es necesario que se cumplan tres propiedades:

1. *Alternativas mutuamente excluyentes:* El agente elige solo una alternativa del conjunto de elección.
2. *El conjunto debe ser exhaustivo:* El agente debe elegir necesariamente una de las alternativas.
3. *Número de alternativas finito.*

Por otro lado, cuando se aborda la característica de probabilidades elección se debe tener en cuenta que los modelos de elección discreta están bajo el supuesto de racionalidad de los agentes y, por lo tanto, estos buscan en todo momento maximizar su utilidad. Cada alternativa perteneciente al conjunto de elección genera cierto nivel de utilidad al agente; sin embargo es importante resaltar que dicha utilidad es conocida únicamente por quien toma la decisión. En este caso se va a denotar la utilidad del individuo  $i$  respecto a la alternativa  $j$  como  $U_{ij}$ , la cual a su vez está compuesta de una parte que es observada por el investigador  $V_{ij}$  y un factor desconocido que afecta los niveles de utilidad  $\varepsilon_{ij}$ . Es decir que la utilidad del individuo  $i$  respecto a la alternativa  $j$  está definida por la ecuación [1]:

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad [1]$$

De acuerdo con Train (2003: pp 20),

*El investigador no conoce  $\varepsilon_{ij} \forall j$ , por lo que trata estos términos como variables aleatorias. La densidad de probabilidad conjunta del vector aleatorio  $\varepsilon'_i = \{\varepsilon_{i1}, \dots, \varepsilon_{ij}\}$  se denota como  $f(\varepsilon_i)$ . Con esta densidad, el investigador puede hacer afirmaciones probabilísticas acerca de la elección del decisor.*

Teniendo en cuenta lo anterior se puede definir la probabilidad de que el individuo  $i$  elija la alternativa  $j$  como se muestra en la ecuación [2]:

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= \text{Prob}(U_{ij} > U_{il} \forall j \neq l) \\
 &= \text{Prob}(V_{ij} + \varepsilon_{ij} > V_{il} + \varepsilon_{il} \forall j \neq l) \\
 &= \text{Prob}(\varepsilon_{il} - \varepsilon_{ij} < V_{ij} - V_{il} \forall j \neq l) \quad [2]
 \end{aligned}$$

Usando la densidad de probabilidad  $f(\varepsilon_i)$ , la expresión anterior que indica la probabilidad de que la diferencia entre las variables aleatorias  $\varepsilon_{il}, \varepsilon_{ij}$  sea menor que la diferencia entre las variables observadas  $V_{ij}, V_{il}$  puede reescribirse como en la ecuación [3], en donde la función indicadora  $I$  toma el valor de 1 si se elige  $j$ :

$$\int_{\varepsilon} I(\varepsilon_{il} - \varepsilon_{ij} > V_{ij} - V_{il} \forall j \neq l) f(\varepsilon_i) d\varepsilon_i \quad [3]$$

Una vez definida la forma de la probabilidad de elección asociada a cada alternativa se debe especificar el modelo que se usará para estimar dicha probabilidad, esta especificación dependerá de la distribución de la densidad de probabilidad de la parte no observada de la utilidad definida previamente. El modelo que se utiliza usualmente para abordar este tipo de problemas es el Logit (binomial o multinomial), pues este es el modelo de elección discreta más simple y más usado, ya que, es consistente con el comportamiento del decisor orientado a la maximización de la utilidad (Train, 2003).

El modelo Logit (binomial o multinomial) tiene en cuenta la forma descrita anteriormente de la utilidad aleatoria, pues sugiere que las decisiones de un individuo respecto a una alternativa  $J$  están compuestas por un componente que es conocido y por un componente aleatorio. El supuesto principal en este tipo de modelos está relacionado con la distribución de cada  $\varepsilon_{ij}$ , pues se supone que cada uno de estos distribuye idéntica e independientemente como una densidad de probabilidad tipo valor extremo o Gumbel, ecuación [4].

$$f(\varepsilon_{nj}) = e^{-\varepsilon_{nj}} e^{-e^{\varepsilon_{nj}}} \quad [4]$$

Es necesario tener en cuenta que la resta de dos variables que distribuyen valor extremo conduce a una distribución de forma logística (Train, 2003) y forman parte del método de derivación de las probabilidades de elección Logit propuesto por McFadden en 1974. Dado lo anterior, la probabilidad de que un individuo  $i$  elija la alternativa  $j$  está dado por la ecuación [5]:

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= \text{Prob}(V_{ij} + \varepsilon_{ij} > V_{il} + \varepsilon_{il} \forall j \neq l) \\
 &= \text{Prob}(\varepsilon_{il} < \varepsilon_{ij} + V_{ij} - V_{il} \forall j \neq l) \quad [5]
 \end{aligned}$$

Después de seguir el método de derivación de McFadden se llega a la expresión que representa la probabilidad de elección Logit, esta se escribe inicialmente en términos de  $V_{ij}$ , pero de acuerdo con Cameron & Trivedi (2005) para un modelo Logit Multinomial  $V_j =$

$X'\beta_j$ , esta nueva forma permite escribir la probabilidad de elección Logit en términos de variables observadas, como la ecuación [6]:

$$P(y = j|X) = \frac{\exp(X'\beta_j)}{1 + \sum_{l=1}^J \exp(X'\beta_l)} \quad [6]$$

La expresión anterior permite explicar el modelo econométrico usado para esta investigación. Primero, la variable  $y$  está definida como la variable dependiente, es una variable categórica que toma valores  $\{1, 2, 3, \dots, 9\}$ , cada uno de estos valores representa un modo de transporte {Caminando, bicicleta, moto, bus, informal, taxi, privado, Metro y SIT} respectivamente, cada modo de transporte puede ser elegido por los individuos para realizar el desplazamiento a su lugar de trabajo. Siguiendo con el análisis de la expresión anterior, la elección de un modo de transporte  $j$  está condicionada a un set de covariables nombrados como  $X$  en la expresión matemática. En el modelo este conjunto  $X$  está compuesto por siete covariables que influyen en la decisión del modo de transporte por medio del cual el agente se desplaza hacia su trabajo. Estas covariables son: Tiempo promedio de viaje, estrato socioeconómico, ingresos mensuales, salario mensual, gastos mensuales, gasto mensual en transporte y sexo.

### 5. Datos y estadística descriptiva

Los datos que se han utilizado para describir la situación de movilidad en la ciudad de Medellín provienen en su mayoría de las EOD de 2005 y 2012, algunos datos han sido tomados directamente de los resultados que publican en estas encuestas; otros por su parte, han sido obtenidos de los reportes de Calidad de Vida elaborados por Medellín Como Vamos, los cuales también están basados en información proveniente de las EOD. Sin embargo, los datos por individuos de la EOD son de carácter confidencial y el acceso a ellos está restringido a un reducido grupo de personas, por lo cual no fue posible acceder a la versión más reciente de esta encuesta para la elaboración de esta investigación.

**Tabla 5 Estadísticas descriptivas**

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Estrato	14119	2,85	1	1	6
Sexo	14119	1,41	0,4913534	1	2
Tiempo empleo	14119	1,95	0,9098545	1	5
Transporte	14003	4,54	1,98	1	9
Salario	9800	969718,5	995925,7	0	9500000
Gasto Mensual	13611	1286190	1158612	1500	9000000
Gasto en transporte	14020	126851	181266,6	0	4500000
ingreso mensual	14110	1183842	1050451	0	9520000

*Fuente: Elaboración propia*

Teniendo en cuenta esta coyuntura, se pensó en fuentes alternativas que contaran con información similar a la encontrada en la EOD y que permitan modelar las elecciones de transporte de los habitantes de Medellín. En este sentido, la encuesta utilizada para este trabajo es la Encuesta de Calidad de Vida (ECV) para Medellín del año 2012, se elige este año, ya que coincide con el año de realización de la EOD más reciente.

La ECV se realiza anualmente desde el año 2004 y su más reciente versión data del año 2014, esta tiene como objetivo seguir y medir las condiciones socioeconómicas de los habitantes de Medellín, pues esta encuesta arroja información estadística acerca de índices relacionados con población, vivienda, hogar, empleo, trabajo, entre otros.

Para los objetivos de este trabajo la ECV aporta información que permite caracterizar las condiciones socioeconómicas de los habitantes de Medellín, pues es posible obtener variables por individuo con información acerca de su edad, comuna a la que pertenece y estrato socioeconómico relacionado con esta, condición laboral, salario, ingresos mensuales y gastos mensuales.

En cuanto a factores económicos la ECV posee más información que la EOD, lo que permite conocer de mejor manera el efecto que tienen las variables económicas sobre la decisión del medio de transporte a utilizar. En cuanto a factores de ubicación relacionados con la realización del viaje, la ECV no posee tanta precisión como la EOD, ya que esta última tiene discriminado el motivo, tiempo promedio, origen y el destino del viaje. Con la ECV solo es posible tener como motivo de viaje la opción “ir a trabajar”, pero de acuerdo la EOD este motivo de viaje es el más común entre los habitantes de Medellín pues el 43% de los viajes en la ciudad son realizados por esta razón (*Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad, 2012*). El origen del viaje puede ser conocido en la ECV ya que se cuenta con la comuna en la que vive la persona y el estrato socioeconómico como variables asociadas a ubicación, además, es posible conocer el tiempo promedio del viaje realizado por la persona cuando se dirige a su empleo. Por último, la ECV permite conocer el medio de transporte utilizado por las personas para desplazarse a trabajar.

La muestra utilizada para esta investigación contiene 14.119 observaciones las cuales son estudiadas a la luz de un set de covariables, dicho set está compuesto por ocho covariables, cuatro de estas son variables categóricas: Estrato socioeconómico, sexo, medio de transporte y tiempo de viaje, mientras que las otras cuatro variables son continuas: Salario, gasto en transporte mensual, ingresos mensuales y gastos mensuales.

Como se muestra en la Tabla 6, el estrato socioeconómico contiene seis categorías, de las cuales los estratos 1, 2 y 3 contienen cerca del 75% de la muestra, mientras que los estratos 4,5 y 6 representan el 25 % restante. En cuanto a la participación por género en la muestra se cuenta con 59% de hombres y 41% mujeres. La variable tiempo de desplazamiento está compuesta por cinco categorías que representan el rango de tiempo medido en minutos que toma desplazarse al lugar de empleo, las categorías son: [0,20], [21,40], [41,60], [61,80] y [80,+]. El tiempo promedio de desplazamiento en Medellín está entre 21 minutos y 40 minutos. La última variable categórica es el modo de transporte la cual contiene nueve categorías, estas representan las diferentes opciones que tienen los habitantes para realizar su viaje al trabajo, las opciones son: Caminata, bicicleta, moto, bus, transporte informal, taxi, vehículo particular, metro y rutas integradas del metro (SIT). La opción más utilizada para desplazarse al trabajo es Bus, pues representa el 50% de la elección de la muestra, el viaje en automóvil privado es la segunda opción más elegida con el 14% seguida por la opción moto con 11% de participación, en cuarto lugar está la caminata con el 8,7% y, por último, la

opción Metro con 7,5%, estos cinco medios de transporte son los más usados para desplazarse al trabajo.

**Tabla 6 Frecuencias de variables categóricas**

<b>Variable</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Variable</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>Estrato</b>			<b>Modo de Transporte</b>		
1	1789	12,67%	Caminando	1231	8,79%
2	467	33,08%	Bicicleta	85	0,61%
3	4169	29,53%	Moto	1559	11,13%
4	1598	11,32%	Bus	7083	50,58%
5	1211	8,58%	Informal	276	1,97%
6	682	4,83%	Taxi	313	2,24%
Total	14119	100%	Particular	204	14,57%
<b>Tiempo de viaje</b>			Metro	1053	7,52%
[0,20]	4846	34,32%	SIT	363	2,59%
[21,40]	619	43,84%	Total	14,003	100%
[41,60]	2294	16,25%	<b>Sexo</b>		
[61,80]	504	3,57%	Hombre	8368	59%
[80,+]	285	2,02%	Mujer	5751	41%
Total	14119	100%	Total	14119	100%

*Fuente: Elaboración propia*

Por otro lado, se encontró que el salario mensual promedio de la población que hace parte de la muestra es de 969.718 pesos colombianos, el gasto mensual promedio es de 1.286.190 pesos colombianos, el ingreso mensual promedio es de 1.183.842 y el gasto en transporte mensual promedio es de 126.851 pesos colombianos.

## 6. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos de la estimación del modelo Logit multinomial, para este fin se utilizó la alternativa “Transporte particular” como categoría base y a partir de esta se realizan las comparaciones con los otros medios de transporte que pueden utilizar los individuos para desplazarse a su trabajo. Los resultados se muestran inicialmente en términos del logaritmo de Odds, los cuales permiten hacer comparaciones entre la probabilidad de que se elija la alternativa base en comparación con las otras posibilidades de elección. Posteriormente se harán variaciones en la covariable gasto en transporte, manteniendo todas las otras covariables constantes, con el objetivo de encontrar los efectos marginales asociados a dicho gasto y, así, observar cómo cambia la probabilidad de elegir determinando medio de transporte a medida que va variando el gasto mensual en transporte.

Las Tablas 7 y 8 contienen los resultados de la estimación del Logit Multinomial, es importante tener presente que la alternativa “Transporte Particular” no aparece en ninguna de las dos tablas debido a que esta es la alternativa base. Por otro lado, las covariables que son de tipo categóricas les faltará una opción, esta deberá ser pensada como la opción de comparación para las alternativas restantes.

**Tabla 7. Estimación Logit Multinomial**

<b>VARIABLES</b>	<b>Caminando</b>	<b>Bicicleta</b>	<b>Moto</b>	<b>Bus</b>
<b>2.Estrato</b>	-1.313*** (0.384)	-0.786 (0.490)	-0.588* (0.342)	-0.872*** (0.330)
<b>3.Estrato</b>	-2.145*** (0.378)	-1.575*** (0.508)	-1.480*** (0.331)	-1.826*** (0.317)
<b>4.Estrato</b>	-3.460*** (0.434)	-1.954*** (0.657)	-2.692*** (0.347)	-2.700*** (0.323)
<b>5.Estrato</b>	-3.826*** (0.447)	-2.391*** (0.796)	-3.477*** (0.370)	-3.417*** (0.331)
<b>6.Estrato</b>	-2.796*** (0.532)	-28.51 (497,097)	-4.501*** (0.553)	-3.459*** (0.368)
<b>2.Tiempo_empleo</b>	-2.250*** (0.183)	-0.173 (0.289)	-0.250** (0.104)	0.469*** (0.0906)
<b>3.Tiempo_empleo</b>	-2.647*** (0.388)	-0.617 (0.480)	-0.687*** (0.169)	0.729*** (0.138)
<b>4.Tiempo_empleo</b>	-2.625** (1.053)	1.374** (0.557)	-0.773* (0.401)	1.355*** (0.305)
<b>5.Tiempo_empleo</b>	-25.62 (101,239)	-0.424 (1.079)	-1.457*** (0.497)	0.925*** (0.332)
<b>2.Sexo</b>	0.603*** (0.146)	-26.20 (81,632)	-1.047*** (0.110)	0.622*** (0.0839)
<b>Salario</b>	-9.62e-07*** (1.24e-07)	-1.33e-06*** (3.69e-07)	-4.63e-07*** (5.81e-08)	-5.68e-07*** (4.11e-08)
<b>Gasto mensual</b>	5.34e-08 (9.23e-08)	1.60e-07 (2.05e-07)	-9.43e-08 (6.70e-08)	-9.37e-08** (4.75e-08)
<b>Gasto transporte</b>	-0.00281 (0.129)	-1.06e-06 (1.59e-06)	-1.33e-06*** (4.18e-07)	2.82e-06*** (2.99e-07)
<b>Ingreso mensual</b>	-4.00e-07*** (1.20e-07)	-1.25e-06*** (4.18e-07)	-6.74e-08 (7.21e-08)	-3.90e-07*** (5.42e-08)

Errores estándar en paréntesis

\*\*\* p<0.01, \*\* p<0.05, \* p<0.1

*Fuente: Elaboración propia*

Analizando las tablas 7 y 8 es posible notar que en general el cambio de estrato, es decir, pasar del estrato 1 que es el nivel base, a alguno de los otros estratos (2, 3, 4,5 o 6) disminuirá el riesgo relativo de tomar alguno de los medios de transporte en comparación con el automóvil privado. Esto sugiere que la elección del medio de transporte va a estar influenciada por el estrato socioeconómico de los individuos y a medida que el estrato es mayor la opción de ir al trabajo en automóvil privado es preferida comparativamente con los otros medios de transporte. De igual forma el tiempo promedio de ir al trabajo parece influenciar la elección del medio de transporte, pero a diferencia del estrato socioeconómico su influencia no se mantiene uniforme para todas las alternativas de transporte. Por ejemplo,

cuando el tiempo de viaje pasa de estar en el intervalo de [0,20] minutos al intervalo de [21,40] minutos, para la alternativa Caminando el riesgo relativo de tomar esta opción en comparación con la de Transporte Particular disminuye -2.25, mientras que para la alternativa “Bus” este mismo cambio representa un aumento de 0.47 en el riesgo relativo de elegir este medio de transporte en relación con el medio de comparación.

En cuanto a las variables continuas, la interpretación de los coeficientes que arroja el proceso de estimación se debe pensar de la siguiente manera: Un aumento en una unidad de la variable continua es asociado con un incremento/disminución en el riesgo relativo de usar alguno de los medios de transporte en comparación con la opción de viajar en transporte particular. De acuerdo con lo anterior un aumento en una unidad del Salario genera una disminución en el riesgo relativo de elegir los diferentes medios de transporte en comparación con el automóvil. Este mismo comportamiento se puede evidenciar en el ingreso mensual, pues un incremento en una unidad está implicando una disminución en el riesgo relativo de elegir los diferentes medios de transporte en relación con el transporte particular. Para ambas variables hay una tendencia hacia la disminución del riesgo relativo cuando hay un aumento de una unidad, ya sea en el salario o en el ingreso mensual, esto da indicios de que a mayor poder adquisitivo es más preferido el uso del automóvil privado.

La covariable gasto en transporte tiene gran importancia para este estudio, pues es a partir de esta que se analiza el comportamiento de las decisiones de los agentes. Se espera que a medida que varíe el gasto, la elección del medio de transporte para desplazarse hacia el trabajo tenga modificaciones, pues suponiendo la implementación de un cobro por congestión sería esta variable la que se vería afectada. En cuanto a los coeficientes que miden el riesgo relativo se encontró un comportamiento particular, pues un incremento en una unidad del gasto en transporte no tiene un impacto significativo en los coeficientes asociados al riesgo relativo de los medios de transporte caminata y bicicleta, mientras que para la alternativa viajar en moto arroja un signo diferente al esperado. Para las alternativas de transporte restantes, el signo del coeficiente del riesgo relativo es el esperado desde la teoría económica, pues dado un incremento unitario en el gasto en transporte y manteniendo todas las otras covariables constantes, el riesgo relativo de permanecer en el medio de transporte bus, metro, taxi o SIT incrementa en comparación con la alternativa de viajar en automóvil privado. El hecho de que algunos medios de transporte no tuvieran un coeficiente de riesgo significativo o con el signo adecuado, se puede justificar por el hecho de que medios de transporte como bus, metro, taxi o SIT son mejores sustitutos del automóvil particular que la caminata o el viaje en bicicleta.

**Tabla 8 Estimación Logit Multinomial**

<b>VARIABLES</b>	<b>Transporte informal</b>	<b>Taxi</b>	<b>Metro</b>	<b>SIT</b>
<b>2.Estrato</b>	-0.854** (0.390)	-0.866* (0.476)	-0.756** (0.342)	-0.414 (0.382)
<b>3.Estrato</b>	-1.947*** (0.385)	-1.531*** (0.460)	-1.897*** (0.333)	-1.348*** (0.376)
<b>4.Estrato</b>	-3.166*** (0.449)	-2.251*** (0.485)	-2.821*** (0.362)	-2.651*** (0.443)
<b>5.Estrato</b>	-3.801*** (0.512)	-2.319*** (0.500)	-3.494*** (0.406)	-3.866*** (0.599)
<b>6.Estrato</b>	-2.698*** (0.547)	-3.504*** (0.695)	-3.331*** (0.536)	-2.031*** (0.558)
<b>2.Tiempo_empleo</b>	0.473** (0.198)	-0.826*** (0.181)	0.659*** (0.137)	0.613*** (0.199)
<b>3.Tiempo_empleo</b>	1.203*** (0.237)	-1.801*** (0.440)	1.625*** (0.173)	1.568*** (0.228)
<b>4.Tiempo_empleo</b>	1.344*** (0.459)	-0.492 (0.652)	2.334*** (0.333)	2.488*** (0.381)
<b>5.Tiempo_empleo</b>	-0.152 (0.790)	-0.772 (0.778)	1.065*** (0.409)	0.256 (0.679)
<b>2.Sexo</b>	0.405*** (0.157)	0.210 (0.171)	0.511*** (0.107)	0.252* (0.145)
<b>Salario</b>	-3.38e-07*** (8.86e-08)	-2.66e-07*** (8.03e-08)	-5.64e-07*** (7.73e-08)	-3.88e-07*** (9.45e-08)
<b>Gasto mensual</b>	2.51e-07*** (8.11e-08)	2.03e-07** (8.24e-08)	-1.88e-07** (8.81e-08)	-4.75e-08 (1.10e-07)
<b>Gasto transporte</b>	3.00e-06*** (4.67e-07)	2.73e-06*** (4.55e-07)	3.07e-06*** (3.73e-07)	3.57e-06*** (4.27e-07)
<b>Ingreso mensual</b>	-5.71e-07*** (1.31e-07)	-3.48e-07*** (1.17e-07)	-5.49e-07*** (1.02e-07)	-5.65e-07*** (1.41e-07)
Errores estándar en paréntesis *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1				

*Fuente: Elaboración propia*

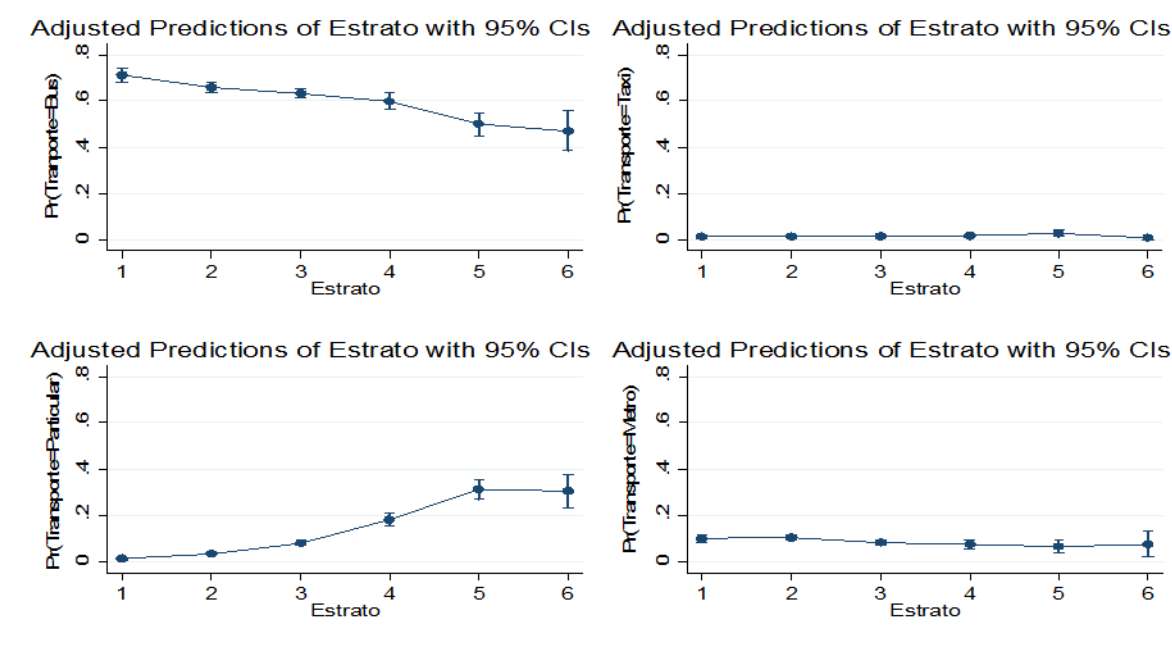
Otra forma de analizar los resultados obtenidos es a través de los efectos marginales, ya que por medio de estos se puede observar como cambios en una variable (manteniendo constantes las otras) modifican la probabilidad de elegir alguno de los medios de transporte. Teniendo en cuenta los resultados expuestos anteriormente los cuales estaban siendo interpretados como coeficientes de riesgo relativo, se decidió analizar detenidamente por medio de los efectos marginales las variables estrato socioeconómico y gasto en transporte, con el objetivo de analizar como el pertenecer a un estrato influye en la elección del medio de transporte que se utiliza para desplazarse a trabajar y, como aumentos en el gasto en transporte influyen en la decisión de seguir utilizando el transporte privado.

En el caso del estrato socioeconómico nos interesa conocer la relación que tiene este con la probabilidad de elegir un medio de transporte. De acuerdo con el gráfico 4 las probabilidades que se ven más afectadas por los estratos socioeconómicos son las asociadas con la elección



del automóvil privado y el bus como medio de transporte. Sin embargo, para la alternativa viajar en Bus la probabilidad de ser elegida por un individuo promedio en cada uno de los diferentes estratos es en general mayor que la probabilidad de la alternativa viajar en automóvil privado. Por ejemplo, el estrato 1 tiene una probabilidad cercana al 71% de viajar en Bus, mientras para la alternativa de viaje en automóvil privado, este estrato, tiene una probabilidad asociada cercana a 1.4%. La probabilidad de viajar en bus para los estratos 2 y 3 es aproximadamente 63%, mientras que la probabilidad de viajar en automóvil privado es 3% y 7% respectivamente para cada uno de estos estratos. Los estratos 4, 5 y 6 son los que tienen la probabilidad más alta de viajar en automóvil, para el estrato 4 tiene un valor cercano al 20%, mientras que para los estratos 5 y 6 la probabilidad es aproximadamente 30%.

**Gráfico 4. Probabilidad de elegir un medio de transporte por estrato socioeconómico**



*Fuente: Elaboración propia*

Los resultados anteriores son coherentes con los analizados en las tablas 7 y 8, puesto que a medida que se aumenta el estrato socioeconómico la probabilidad de que un individuo promedio viaje en automóvil va aumentando, mientras que la probabilidad de que este individuo promedio viaje en bus disminuye. En resumen, los resultados anteriores nos permiten conocer cómo se comporta un individuo promedio frente a la decisión de elegir un medio de transporte. Adicionalmente, nos interesa saber cómo el cambio de estrato afecta esta decisión, por lo que se analiza como pasar del estrato 1 a cada uno de los estratos restantes, varía la probabilidad de utilizar taxi, metro, bus o transporte particular. La diferencia entre los resultados que muestra el gráfico 5 y los analizados anteriormente a partir del gráfico 4, es que estos últimos muestran la probabilidad de que un individuo promedio de toda la muestra elija alguna de las alternativas, mientras que en los resultados arrojados

en el gráfico 5 se parte de que cada estrato socioeconómico tiene un individuo promedio, el cual es comparado con el individuo promedio del estrato 1, que es el estrato base.

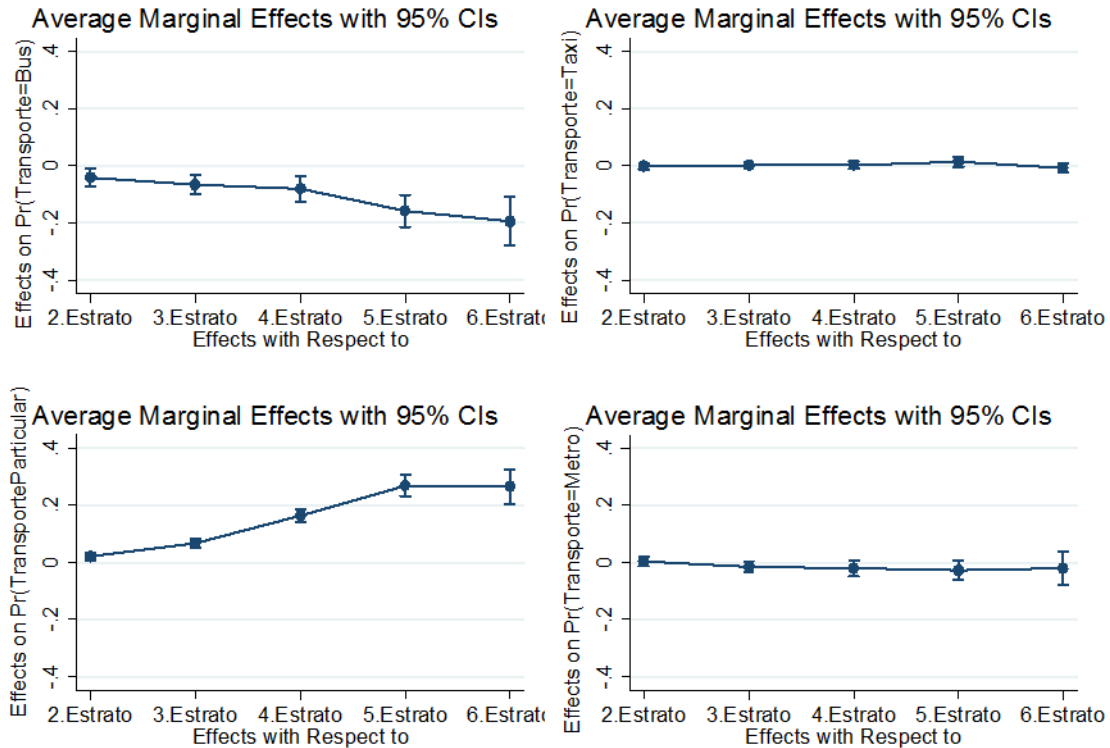
De acuerdo con el gráfico 5, pasar del estrato 1 al 2 disminuye la probabilidad de viajar en bus 4% y aumenta la probabilidad de viajar en automóvil privado 2%, por otro lado, pasar del estrato 1 al 3 disminuye la probabilidad de viajar en bus 6% y aumenta la probabilidad de viajar automóvil 7%. Pasar del estrato 1 al 4 o al 5, representa un aumento en la probabilidad de viajar en automóvil de 16% y 26% respectivamente, mientras que estos mismos cambios disminuyen la probabilidad de usar el bus en 8% y 16% para cada uno de estos estratos. Finalmente, pasar del estrato 1 al 6 disminuye la probabilidad de usar bus 20% y aumenta la probabilidad de usar automóvil 26%.

En resumen, la incidencia del estrato socioeconómico es más fuerte para la decisión de viajar en automóvil privado que en transporte público. Para el transporte público, la curva de probabilidad tiene una forma más suave, como es de esperarse los estratos más altos tienen una probabilidad más baja de usar este tipo de transporte, pero la diferencia no es tan fuerte como lo presenta el uso de automóvil privado, esto implica que a pesar de ser de diferentes estratos los individuos tienen una alta probabilidad de utilizar el transporte público como medio de transporte a diferencia del uso del automóvil privado, el cual es más probable que sea usado por los individuos que pertenecen a los estratos 4, 5 y 6.

Ya se tiene conocimiento de cuales estratos socioeconómicos tienen mayor probabilidad de usar determinados medios de transporte, ahora nos interesa variar el gasto en transporte y observar que ocurre con la elección de las diferentes alternativas. De acuerdo con la tabla 9, un individuo promedio que utiliza automóvil privado para desplazarse a su empleo gasta mensualmente en transporte 142.000COP (pesos colombianos), si se implementara una medida tipo peaje por congestión este gasto se vería incrementado.

Dada la naturaleza de los datos no es posible conocer la disposición a pagar por parte de los individuos frente a diferentes tarifas de congestión, pero si se puede suponer que los aumentos que se van a generar en la variable gasto en transporte se deberán a la internalización del costo de congestión generado por las personas que se desplazan en automóvil a su trabajo, el cual se verá reflejado en el pago de una tarifa de congestión o peaje urbano. Por ahora las estimaciones no están enfocadas para alguna zona específica de la ciudad de Medellín, pues simplemente se desea conocer la elasticidad entre gasto y el tipo de transporte, si inicialmente se encuentra evidencia de que este mecanismo basado en precios logra desincentivar el uso de transporte privado se podría pensar en refinar estas estimaciones, con factores espaciales y otras consideraciones que estén ajustadas a la normatividad existente.

**Gráfico 5. Efectos marginales dependiendo del estrato socioeconómico**

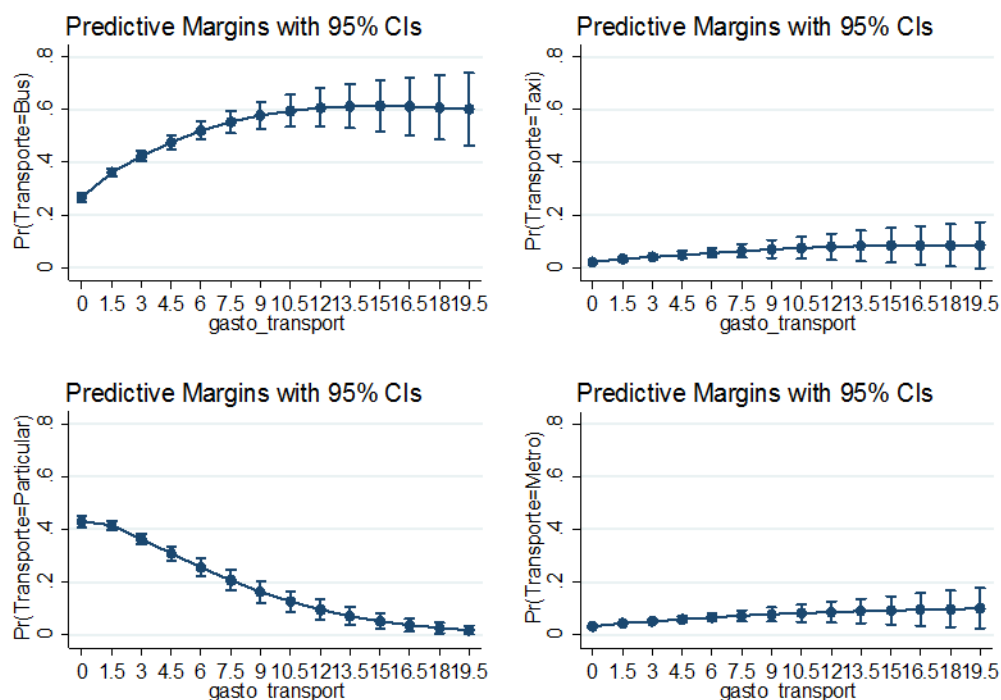


*Fuente: Elaboración propia*

El gráfico 6 presenta las variaciones en la probabilidad de elegir una de las alternativas de desplazamiento cuando cambia el gasto en transporte, es necesario anotar que esta variación se hace únicamente para aquellos individuos que viajan en automóvil privado a sus trabajos, por lo tanto el gráfico está indicando cómo se comporta la probabilidad de que los usuarios de automóvil sigan utilizando este medio de transporte, dados ciertos niveles de gasto o por el contrario sustituyan el transporte particular por alguna de las opciones de transporte público. De nuevo las alternativas caminar, bicicleta y moto no se comportan como sustitutos por tal razón no se muestran en estos gráficos.

De acuerdo con el gráfico 6, a medida que el gasto en el medio de transporte automóvil se incrementa, la probabilidad de que los usuarios lo sigan utilizando va disminuyendo, además de las opciones que brinda el transporte público, el bus es la que más probabilidad tiene de ser utilizada para sustituir el automóvil, lo cual es coherente con los resultados que se han mostrado hasta ahora.

**Gráfico 6. Probabilidad de elegir un medio de transporte cuando varía el gasto en transporte**



*Fuente: Elaboración propia*

Por ejemplo, cuando el gasto mensual en el medio de transporte particular es 150.000 COP la probabilidad de usar el automóvil privado es de 41%, la probabilidad de usar bus es 36%, la de usar taxi es 3% y la de usar metro es 5%, mientras que cuando el gasto mensual asociado al transporte particular es de 300.000 COP la probabilidad de usar el automóvil es de 36%, la probabilidad de usar bus es 42%, la de usar taxi es 4% y la de usar metro es 5%.

Relacionando los dos tipos de resultados obtenidos, se puede encontrar que hay relación entre el tipo de transporte utilizado para ir al trabajo y el estrato socioeconómico, adicionalmente se encontró que a medida que el gasto en transporte particular aumente la probabilidad de usar este disminuye, mientras que la probabilidad de usar transporte público de tipo bus aumenta, en el caso del metro y el taxi hay aumentos de igual manera, pero no son tan drásticos como lo son con el medio de transporte bus. Sin embargo, es importante notar que para los estratos 1 y 2 la posibilidad de sustituir su medio de transporte es menos probable, pues son los que más probabilidad tienen de tomar el bus y son los que menos reaccionan ante un posible cambio de estrato. Por otro lado, los estratos 3,4 5 y 6 podrían sustituir más fácilmente el automóvil privado por el transporte público, siendo los estratos 3 y 4 los que más probabilidad tienen de usar este último.

## 7. Conclusiones

El problema de congestión vehicular se ha ido incluyendo en la agenda de planeación de las principales ciudades del mundo, debido a que es una problemática que afecta el desempeño

económico de algunos sectores y principalmente la calidad de vida de las personas. Por lo tanto, el objetivo de este artículo ha sido diagnosticar el nivel de congestión vehicular de la ciudad de Medellín y proponer alternativas que desde la economía permitan dar solución a dicho problema. De acuerdo con la teoría económica, un mecanismo basado en precios, por ejemplo un peaje urbano, podría contribuir a disminuir los niveles de congestión, pues al pagar la tarifa de este peaje los usuarios internalizan el costo que producen a la sociedad cuando deciden utilizar su automóvil privado, pues así se percibe a partir de la revisión de literatura de las experiencias internacionales relacionadas con el tema. Este artículo a diferencia de la literatura tradicional, propone estudiar la elasticidad del gasto en transporte de la demanda de automóvil privado, en lugar de utilizar la metodología de preferencias declaradas, basado en el supuesto de que la variable gasto en transporte es la que se vería afectada al imponer una tarifa de congestión por medio de un peaje urbano y dichas variaciones modificarían las probabilidades de elección de los agentes entre transporte público y privado.

A partir de la información disponible se propusieron indicadores que permitieran analizar la situación de movilidad de Medellín. Se encontró que el parque automotor presenta tendencia creciente; además de que la infraestructura no es suficiente y que los tiempos de desplazamiento han aumentado. Por lo tanto, estos indicadores aportan evidencia para argumentar que Medellín tiene problemas de congestión vehicular.

Por otro lado, se comparó el tiempo de desplazamiento en Medellín en horas de congestión (pico) versus una situación de no congestión (horas valle), se encontró que cuando hay congestión, en promedio un automóvil utiliza 33% de tiempo extra para recorrer la misma distancia que cuando no hay congestión. Ciudades como Chicago tienen 26% de tiempo extra en los desplazamientos en situaciones de congestión en comparación con situaciones de no congestión y está implementando un plan de movilidad que le permita mejorar estos tiempos de desplazamiento, dicha medida está basada en un mecanismo de precios con el cual se busca internalizar el costo que genera el usuario al utilizar su automóvil privado, anticipando así a los mayores costos, económicos, ambientales y sociales, entre otros, derivados de la congestión. La decisión de pensar en alternativas vía precios cuando el nivel de congestión no es tan dramático surge del comparativo con Ciudad de México, la cual es catalogada como la ciudad más congestionada del mundo con 59% de tiempo extra en desplazamientos, cuya cifra se pretende reducir por medio de políticas y mecanismos que incentiven el uso del transporte público.

A partir de las estimaciones realizadas, se encontró relación entre la probabilidad de usar automóvil privado y el estrato socioeconómico, el cual está influenciado principalmente por el nivel de ingresos. Los resultados indican que a medida que se aumenta de estrato socioeconómico la probabilidad de utilizar transporte privado incrementa, mientras que la probabilidad de usar transporte público disminuye, esto tiene sentido, ya que de acuerdo con la tabla 9 (ver Anexo 1), un individuo promedio de transporte privado es de estrato alto, mientras que un individuo promedio que utiliza el transporte público es de estrato bajo.

Por otra parte, se planteó el supuesto de que un hipotético peaje urbano afectaría el gasto en transporte, por lo que se decidió modificar esta variable y analizar cómo cambia la probabilidad de elección a partir de ese cambio. Los resultados encontrados a partir de dicha modificación es coherente con lo que propone la teoría económica, pues al aumentar el valor del peaje por congestión el cual es representado en el aumento del gasto en transporte, la probabilidad de utilizar el automóvil privado disminuye y la probabilidad de usar el transporte público, principalmente, el bus incrementa.

Los resultados obtenidos en este trabajo contribuyen al planteamiento de políticas públicas, puesto que desde la teoría económica se aporta evidencia a favor de la implementación de mecanismos vía precios para reducir los niveles de congestión, no obstante, estos mecanismos deben ser complementados con el mejoramiento del sistema de transporte público, ya que este medio es usado por una gran cantidad de personas y sería el que absorbería en gran medida a los viajeros que dejarían de utilizar el automóvil privado. Cuando se propone mejorar el transporte público no nos referimos únicamente a inversiones grandes de capital, sino también mejoras sencillas, como por ejemplo, tener información constante y acertada sobre las rutas y periodicidad de estas, es decir mejorar el servicio por medio de una normativa adecuada y apropiada para las necesidades de la ciudad.

Es necesario tener en cuenta que las motocicletas hacen parte del problema de congestión vehicular y no deben ser pensadas como un sustituto del automóvil privado, es decir estas no hacen parte de las alternativas de transporte que podrían mejorar la movilidad en el área de estudio. Por el contrario, de acuerdo con la secretaría de tránsito y movilidad de la ciudad de Medellín, en gran parte de los accidentes de tránsito hay motocicletas involucradas. Apoyados en Vickrey (1969) quien señala que los accidentes de tránsito son una de las causas por las que se generan situaciones de congestión, es posible ver el canal por el que las motocicletas están contribuyendo al problema de congestión vehicular de Medellín.

La no significancia de medios de transporte no motorizados (bicicleta y caminata) como medios sustitutos del automóvil privado deben servir como un llamado de atención a la deficiente infraestructura existente para este tipo de transportes, a pesar de los avances que se han presentado en algunas comunas de la ciudad; por lo tanto, es importante incentivar el uso de la bicicleta y la caminata, debido a la relevancia que ha tomado el cuidado del ambiente, pues este debe ser tenido en cuenta en el momento de planificar las políticas de movilidad de la ciudad y tomar decisiones relacionadas con el sistema de transporte; además de pensar en la sustitución de parte del parque automotor existente como buses, que utilizan diésel por otros sistemas menos contaminantes como eléctrico y, por qué no solar.

## 8. Bibliografía

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá Movilidad. (2012). Encuesta origen y destino de hogares 2012, Disponible en: <http://www.metropol.gov.co/Movilidad/Pages/Inicio.aspx>. (n.d.).
- Arnott, R., Palma, A. De, & Lindsey, R. (2011). A Structural Model of Peak-Period Congestion : A Traffic Bottleneck with Elastic Demand, 83(1), 161–179.
- Asensio, J., & Matas, A. (2008). Commuters' valuation of travel time variability. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(6), 1074–1085. doi:10.1016/j.tre.2007.12.002
- Börjesson, M., Eliasson, J., & Hamilton, C. (2016). Why experience changes attitudes to congestion pricing: The case of Gothenburg. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 85, 1–16. doi:10.1016/j.tra.2015.12.002
- Börjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M. B., & Brundell-Freij, K. (2012). The Stockholm congestion charges-5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*, 20, 1–12. doi:10.1016/j.tranpol.2011.11.001
- Cameron, A. C., & Trivedi, P. K. (2005). *Microeconometrics: methods and applications*. Cambridge university press. Cambridge university press. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Chicago Metropolitan Agency for Planning. (2012). *Congestion Pricing an analysis of the go to 2040 major capital projects*.
- de Rus Mendoza, G., Méndez, J. C., & Merchán, G. N. (2003). *Economía del transporte*.
- Deaton, A. & Muellbauer, J. (1980). An Almost Ideal Demand System. *The American Economic Review*, 70(3), 312–326.
- Downs, A. “. (1962). The law of peak-hour expressway congestion. *Traffic Quaterly*, 16, 393–409.
- Eliasson, J. (2008). Lessons from the Stockholm congestion charging trial. *Transport Policy*, 15(6), 395–404. doi:10.1016/j.tranpol.2008.12.004
- Eliasson, J., & Jonsson, L. (2011). The unexpected “yes”: Explanatory factors behind the positive attitudes to congestion charges in Stockholm. *Transport Policy*, 18(4), 636–647. doi:10.1016/j.tranpol.2011.03.006
- Evans, A. W. (1992). Road congestion pricing : when is it a good policy ? A Comment, 27(1), 91–105.
- Goh, M. (2002). Congestion management and electronic road pricing in Singapore. *Journal of Transport Geography*, 10, 29–38. doi:10.1016/S0966-6923(01)00036-9
- Gonzales-Calderon, C. A. (2009). Estrategias tarifarias y desestimulación del pico y placa en medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14), 95–110.
- González-Calderón, C. A., Henao, J. J. P., & Sánchez-Díaz, I. D. (2012). The need for congestion pricing in medellin : an economic perspective, 123–131.

- Litman, T. (2006). *London Congestion Pricing*.
- Litman, T. (2012). *Gestión de la movilidad para México: Beneficios para su desarrollo económico*.
- Medellín Cómo Vamos. (2012). *Informe de Calidad de Vida de Medellín , 2012*.
- Medellín Cómo Vamos. (2014a). *Informe de Calidad de Vida de Medellín , 2014*.
- Medellín Cómo Vamos. (2014b). *Informe de percepción ciudadana: Movilidad y espacio público*.
- Medina, C. A., & Velez, C. E. (2011). Aglomeración económica y congestión vial: los perjuicios por racionamiento del tráfico vehicular. *Borradores de Economía*.
- Parry, I. W. H., Walls, M., & Harrington, W. (2011). Automobile Externalities and. *Journal of Economic Literature*, 45(2), 373–399.
- Pigou, A. (1920). *The economic of welfare*. London: McMillan&Co.
- Pozueta, J. (2008). La Experiencia Internacional en Peajes Urbanos. *Cuaderno de Investigación Urbanística*, 01–32. Retrieved from [http://oa.upm.es/2846/2/INVE\\_MEM\\_2008\\_59442.pdf](http://oa.upm.es/2846/2/INVE_MEM_2008_59442.pdf)
- Prat, A. M. (2004). Políticas de transporte y congestión en áreas urbanas: un panorama. *Urban Public Economics Review*, no 1, 63–91. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50400103>
- Russo, A. (2015). Pricing of Transport Networks, Redistribution, and Optimal Taxation. *Journal of Public Economic Theory*, 17(5), 605–640. doi:10.1039/c3ce41464g
- Train, K. E. (2003). Discrete Choice Methods with Simulation. *Cambridge University Press*, 1–388. doi:10.1017/CBO9780511753930
- Tyler, N., Bohórquez, J. A., Suescún, J. P. B., & Velásquez, J. M. (2013). *Cobro de congestión en ciudades Colombianas*.
- Vickrey, W. (1969). Congestion theory and transport investment. *American Economic Review*.
- Walters, A. (1961). The theory and measurement of private and social costs of highway congestion. *Econometrica*, 19, 676–679.
- Yang, H. A. I. (1999). Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion, 299–322.
- Zhao, Z., an, S., & Wang, J. (2010). Development and Inspiration of Road Congestion Pricing Revenue Redistribution Theory Research. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 10(4), 93–100. doi:10.1016/S1570-6672(09)60058-1



## Anexo 1

**Tabla 9. Individuo promedio de cada medio de transporte**

<b>Transporte</b>	<b>Caminando</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,48	0,50	1	2
Estrato	2,57	1,20	1	6
Tiempo promedio de viaje	1,15	0,45	1	4
Salario	628777,5	631407,3	0	5000000
Ingreso Mensual	757351,7	784321,1	0	7450000
Gasto Mensual	971250,9	1051789	20000	9000000
Gasto mensual en transporte	0	0	0	0
<b>Transporte</b>	<b>Bicicleta</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,06	0,24	1	2
Estrato	2,44	1,02	1	5
Tiempo promedio de viaje	1,80	0,94	1	5
Salario	635510,3	262052,3	0	1600000
Ingreso Mensual	734937,2	487898,6	0	3470000
Gasto Mensual	919600	643609,6	100000	3500000
Gasto mensual en transporte	69174,38	88461,38	0	400000
<b>Transporte</b>	<b>Moto</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,15	0,36	1	2
Estrato	2,64	1,00	1	6
Tiempo promedio de viaje	1,69	0,73	1	5
Salario	841477,3	588787,7	0	8000000
Ingreso Mensual	1042230	655778,1	0	6550000
Gasto Mensual	1102539	742762,4	50000	8000000
Gasto mensual en transporte	88099,1	133508,3	0	2500000
<b>Transporte</b>	<b>Bus</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,46	0,50	1	2
Estrato	2,54	1,09	1	6
Tiempo promedio de viaje	2,14	0,90	1	5
Salario	791851,8	663489,5	0	7000000
Ingreso Mensual	1012082	761513,2	0	9520000
Gasto Mensual	1065397	826745,9	1500	9000000
Gasto mensual en transporte	146378,5	173791	0	3000000
<b>Transporte</b>	<b>Informal</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,42	0,49	1	2
Estrato	2,79	1,31	1	6
Tiempo promedio de viaje	2,19	0,89	1	5
Salario	972684,2	942993,8	0	5670000
Ingreso Mensual	1184125	998319,4	32000	5340000
Gasto Mensual	1396241	1413028	170000	9000000
Gasto mensual en transporte	158240	162356,4	0	1250000
<b>Transporte</b>	<b>Taxi</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,37	0,48	1	2

Estrato	3,32	1,29	1	6
Tiempo promedio de viaje	1,50	0,78	1	5
Salario	1252811	1138124	0	7500000
Ingreso Mensual	1476393	1091449	0	5479999
Gasto Mensual	1705757	1318768	100000	8000000
Gasto mensual en transporte	165839,2	201502,3	0	1250000
<b>Transporte</b>	<b>Particular</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,38	0,49	1	2
Estrato	4,44	1,25	1	6
Tiempo promedio de viaje	1,74	0,81	1	5
Salario	2205420	1793484	0	9500000
Ingreso Mensual	2273044	1634400	0	9520000
Gasto Mensual	2565779	1701088	1500	9000000
Gasto mensual en transporte	142236,6	239097,1	0	4500000
<b>Transporte</b>	<b>Metro</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,43	0,50	1	2
Estrato	2,40	1,05	1	6
Tiempo promedio de viaje	2,43	0,93	1	5
Salario	747559,7	576369,1	0	6000000
Ingreso Mensual	942483,3	740994,8	0	6000000
Gasto Mensual	982197,9	759622,6	30000	7000000
Gasto mensual en transporte	149019,3	216485	0	2600000
<b>Transporte</b>	<b>SIT</b>			
<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Std. Dev</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
Sexo	1,41	0,49	1	2
Estrato	2,58	1,14	1	6
Tiempo promedio de viaje	2,39	0,92	1	5
Salario	845267,9	752161,9	0	6200000
Ingreso Mensual	1055369	745709,7	0	6290000
Gasto Mensual	1117418	881150,1	150000	9000000
Gasto mensual en transporte	171759,8	142185,1	0	800000

*Fuente: Elaboración propia*

## Anexo 2

Una comparación de indicadores de congestión vehicular realizada por países, permite encontrar de manera agredada como variables socioeconomicas y propias de cada territorio contribuyen a explicar la presencia de situaciones de congestión en cada uno de estos países. La tabla permite observar la relación existente entre el número de vehículos por cada 1000 habitantes y el ingreso per cápita, se destaca que a medida que aumenta este último la presencia de vehiculos incrementa, esta relación implica que el nivel de ingreso influye en el tamaño del parque automotor en un territorio. Adicionalmente, en áreas reducidas se incrementa la densidad de vehículos por kilómetro, lo que genera también situaciones de congestión vehicular.

**Tabla 10. Indicadores de congestión por países**

<b>País</b>	<b>Vehículos por 1000 habitantes</b>	<b>Vehículos por km de carretera</b>	<b>Km de carretera por cada 100 km2 de superficie terrestre</b>	<b>Área Km2</b>	<b>Ingreso per cápita</b>	<b>Nivel de ingreso</b>
Colombia	71	25	15	1.141.748	7140	Medio alto
Perú	68	16	10	1.285.220	5650	Medio alto
Ecuador	57	18	17	256,37	5410	Medio alto
Chile	134	78	10	756.096	14350	Alto
México	276	81	19	1.964.380	9560	Medio alto
Estados Unidos	802	38	67	9.831.510	55530	Alto
Reino Unido	523	77	172	243,61	41010	Alto
Singapur	156	232	473	716	51390	Alto
Suecia	519	8	129	447,42	58680	Alto

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial*

Además al realizar el análisis de estos indicadores se debe tener cuidado, ya que las cifras absolutas para cada país pueden ser engañosas, debido a que la congestión puede estar concentrada en algunas regiones o ciudades específicas, donde hay mayor nivel de desarrollo y crecimiento, por ejemplo, puede resaltarse en términos comparativos, como Singapur a pesar de tener el mayor número de Kms de carretera por cada 100 km2 de superficie terrestre (473) para los países de la muestra en la tabla, asimismo presenta el mayor número de vehículos por kilómetro de carretera (232); comparativamente con Suecia, cuya área es menor, y estos dos indicadores son de 129 Kms de carretera por cada 100 Km2 de superficie y 8 vehículos por kilómetro de carretera y, tanto en Singapur como en Estocolmo hay peaje por congestión. Por su parte, cuando se analiza México desde estos indicadores se encuentra en un nivel intermedio de congestión y, como se mencionó anteriormente, en el caso específico de Ciudad de México es la ciudad más congestionada del mundo, cuando se considera el indicador vía tiempo.